

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

NEUTRONOVÉ ZDROJE VE VĚDĚ A PRŮMYSLU

NEUTRON SOURCES IN SCIENCE AND INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Andrýsek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dušan Král

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Jan Andryšek

ID: 186415

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Neutronové zdroje ve vědě a průmyslu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte rešerši principu fungování neutronových zdrojů, účel jejich použití, jejich výskyt v ČR a ve světě.
2. Popište možnosti návrhu jednoduchého neutronového zdroje založeného na fotojaderné reakci (γ, n).
3. Proveďte vyhodnocení a porovnání experimentálních výsledků pro experiment s BeO a LiCl konvertorem.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

FERNANDEZ-ALONSO, Felix; PRICE, David L. Neutron Scattering. Academic Press, 2013.

Cierjacks, S., & Smith, A.B. Igarashi, S. (Ed.). (1988). Neutron sources. Japan: Saikon Publishing Co, Ltd.

Csikai, G.J. (1987). CRC handbook of fast neutron generators. United States: CRC Press Inc.

BAUER, Günter Siegfried. Physics and technology of spallation neutron sources. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2001, 463.3: 505-543.

MENDONÇA, J. T.; DAVIES, J. R.; ELOY, M. Proton and neutron sources using terawatt lasers. Measurement Science and Technology, 2001, 12.11: 1801.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 10.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Dušan Král

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce obsahuje rešerši na téma neutronových zdrojů a experimentální část zpracovávající reakční rychlosti v experimentálním modelu neutronového zdroje v závislosti na typu izotopu použité fólie. Jsou zde vypsány nejvyužívanější neutronové zdroje ve světě i v České republice. Je popsán vznik neutronů u radionuklidových zdrojů AmBe a PuBe, jaderných reaktorů, spalačních zdrojů a fúzních neutronových generátorů. U těchto zařízení je popsáno jejich využití ve vědě a průmyslu. Od každého typu je vybráno několik příkladů, u kterých je detailně popsána technologie. V praktické části je popis návrhu (γ, n) neutronového zdroje v programu MCNP a jeho následný výpočet metodou Monte-Carlo. Vstupem pro jadernou reakci jsou zde elektrony urychleny na energii 70 MeV, které naráží na terč, kde se díky brzdnému záření generují gama paprsky. Záření následně interaguje s jádery konvertoru z oxidu beryllia nebo lithné soli. Zpracovány jsou výsledky z experimentálního měření v Jerevanu pro fólie z izotopů ^{197}Au , ^{209}Bi a ^{59}Co . Tyto fólie byly využity u modelů s konvertory z Beo a LiCl.

Klíčová slova

Neutronové zdroje, výzkumné reaktory, spalační zdroje, radionuklidové zdroje, neutronové generátory

Abstract

This bachelor thesis is composed of literature review on the topic of neutron sources and experimental component discussing the reaction rate in an experimental model of a neutron source dependent on the isotope in used foil. The most used neutron sources in the world and in the Czech Republic are mentioned. The creation of neutrons in radionuclide sources in AmBe and PuBe, nuclear reactors, spallation sources and fusion neutron generators are described, together with their utilisation in research and industry. The practical part contains description of the design (γ, n) of a neutron source in MCNP programme and its consecutive calculation using the Monte-Carlo method. The input for nuclear reaction are electrons accelerated onto energy of 70 MeV. These electrons strike the target, where the effect of braking radiation generates gamma rays. Radiation integrates with the nuclei of the convertor from beryllium oxide or lithium salt. The results analysed and discussed are used from experimental measurements in Yerevan for foils from isotopes ^{197}Au , ^{209}Bi and ^{59}Co . These foils were used in models with convertors from Beo and LiCl.

Key words

Neutron sources, research reactors, spallation sources, radionuklid sources, neutron generator

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Neutronové zdroje ve vědě a průmyslu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně

.....

.

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Dušanu Králi za vedení, konzultace, trpělivost, podnětné návrhy a připomínky k práci. Dále bych rád poděkoval dalším vyučujícím, kteří mi poskytli vzdělání v oboru jaderné energetiky. Dále bych pak poděkoval ostatním, od kterých mi byla poskytnuta pomoc a podpora při vypracování této práce.

V Brně

.....

podpis autora

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	11
1 Úvod	2
2 Teoretický rozbor	3
3 Radionuklidové zdroje neutronů	6
3.1 Spontanně štěpný zdroj ^{252}Cf	6
3.2 Zdroje využívající (α, n) reakci	7
3.3 Radionuklidové zdroje na bázi (γ, n)	9
4 Jaderný reaktor	10
4.1 Jádro atomu a jeho štěpení	10
4.2 Výzkumné jaderné reaktory	11
4.2.1 Reaktor IBR-2	11
4.2.2 Reaktor LVR-15	13
4.2.3 Reaktor LR-0	14
5 Spalační zdroj neutronů	15
5.1 Evropský spalační zdroj	15
5.2 Spalační neutronový zdroj	16
6 Urychlovače nabitých částic	17
6.1 Elektrostatické lineární urychlovače	17
6.2 Vysokofrekvenční lineární urychlovače s elektrodami	17
6.3 Cyklické urychlovače - Betatron	18
6.4 Cyklické urychlovače - Cyklotron	18
6.5 Cyklické urychlovače - Fázotron	18
6.6 Laserové zdroje neutronů	19
7 Fotojaderné zdroje	20
8 Terčové materiály	22
8.1 Reakce $p + D$	22
8.2 Reakce $p + Be$	22
8.3 Reakce $p + Li$	22
9 Fúzní neutronové generátory	25
9.1 Neutronové zdroje v průmyslu	25
9.2 Neutronová radiografie	26
9.3 Výroba lékařských izotopů	27
9.4 Skenování jaderného paliva	28
9.5 Detekce výbušnin	28
10 Monte Carlo N-Particle	29
10.1 Návrh zdroje	30

11 Aktivační měření	32
11.1 Data měření	34
11.2 Zpracování dat	35
12 Závěr	41

Seznam obrázků

2-1	Stavba atomu [28]	3
2-2	Tabulka nuklidů [16]	4
2-3	Tabulka nuklidů přibližná [31]	4
3-1	Neutronové spektrum spontanně štěpeného zdroje Cf-252 [15]	7
3-2	Neutronová spektra AmBe a PuBe zdroje [17]	8
4-1	Štěpení uranu [19]	11
4-2	Reaktor IBR-2 [27]	11
4-3	Pohyblivé reflektory [27]	12
4-4	Spektrometry okolo IBR-2 [27]	12
4-5	Aktivní zóna reaktoru LVR-15 [22]	13
5-1	Mapa výskytu spalačnických zdrojů.	15
5-2	Spalační zdroj neutronů Oak Ridge, USA [5]	16
6-1	Van de Graffův urychlovač	17
6-2	Schéma lineárního urychlovače s elektrodami	18
6-3	Schéma Cyklotronu [4]	18
6-4	Laserový zdroj neutronů [14]	19
7-1	Brzdné záření [3]	20
7-2	Brzdné záření v závislosti na tloušťce terče (pro tantal), [18]	21
7-3	Spektrum brzdného záření (pro tantal) [18]	21
8-1	Neutronové spektrum p+D [39]	23
8-2	Neutronové spektrum p+Be při úhlu 0 stupňů [39]	23
8-3	Neutronové spektrum p+Li [39]	24
9-1	Atom protia, deuteria a tritia [2]	26
9-2	Neutronový generátor Thermo Scientific API 120 [1]	26
9-3	Telefon zobrazen neutronovou radiografií [30]	27
9-4	Ruční neutronový skener Pilot-M1 Premium [35]	29
10-1	Vstupní textový soubor MCNP	30
10-2	Schéma navrženého modelu s rozměry	31
10-3	Navržený model zobrazen ve 3D	32
11-1	Účinnost detektoru v Yerevanu	38
11-2	Porovnání reakčních rychlostí jednotlivých izotopů u konvertoru BeO	38
11-3	Porovnání reakčních rychlostí jednotlivých izotopů u konvertoru LiCl	39
11-4	Porovnání reakčních rychlostí mezi modely pro izotop 197-Au	39
11-5	Porovnání reakčních rychlostí z obou modelů pro izotop 209-Bi	40
11-6	Porovnání reakčních rychlostí mezi modely pro izotop 59-Co	40

Seznam tabulek

3-0	Spontánně štěpné prvky	7
3-1	Vlastnosti neutronových zdrojů (α, n)	8
3-2	Vlastnosti neutronových zdrojů (γ, n)	9
8-0	Produkční reakce neutronů při interakci $p + D$ [39]	22
8-2	Produkční reakce neutronů při $p + Li$ [39]	24
9-3	Parametry přenosného neutronového detektoru	29
10-1	Přehled Tally a jejich vlastnosti	31
11-0	Tabulka údajů ozařování	34
11-0	Parametry fitovací funkce	35
11-0	Naměřené hodnoty zdroje s BeO konvertorem	36
11-0	Naměřené hodnoty zdroje s LiCl konvertorem	37

Seznam symbolů a zkratek

Veličina	Název
<i>A</i>	Nukleonové číslo
<i>AV</i>	Akademie věd
<i>BWR</i>	Boiling Water Reactor / Varný reaktor
<i>CPA</i>	Chirped Pulse Amplification
<i>ČR</i>	Česká republika
<i>ČVUT</i>	České Vysoké učení technické
<i>D</i>	Deuterium
<i>ESS</i>	European Spallation Source / Evropský Spalašný zdroj
<i>eV</i>	Elektron Volt
<i>FJFI</i>	Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
<i>K</i>	Kelvin
<i>keV</i>	Kilo elektron Volt
<i>kWe</i>	Kilo Watt elektrický
<i>kWt</i>	Kilo Watt tepelný
<i>LR</i>	Lehkodvodní reaktor
<i>LVR-15</i>	Lehkodvodní reaktor
<i>MCNP</i>	Monte Carlo N-Particle / Monte Carlo N-Částice
<i>MeV</i>	Mega elektron Volt
<i>MWe</i>	Mega Watt elektrický
<i>MWt</i>	Mega Watt tepelný
<i>N</i>	Neutronové číslo
<i>NDT</i>	Non-destructive testing / Nedestruktivní testování
<i>ORNL</i>	Oak Ridge Neutron Laboratory / Neutronová laboratoř v Oak Ridge
<i>PFNA</i>	Pulse Fast Neutron Analysis / Pulzní analýza rychlými neutrony
<i>PWR</i>	Pressurized Water Reactor / Tlakovodní reaktor
<i>RPA</i>	Radiation Pressure Acceleration / Radiační tlakové urychlování
<i>SLAC</i>	Stanford Linear Accelerator Center / Centrum lineárního urychlovače ve Stanfordu
<i>SNM</i>	Special Nuclear Material / Speciální jaderný materiál
<i>T</i>	Tritium
<i>TNSA</i>	Target Normal Shear Acceleration
<i>TR</i>	Těžkovodní reaktor
<i>ÚJV</i>	Ústav Jaderného Výzkumu
<i>USA</i>	United States of America / Spojené státy Americké
<i>VVER</i>	Vodo-vodní energetický reaktor
<i>VVR</i>	Vodo-vodní reaktor
<i>Z</i>	Protonové číslo

1 Úvod

Bakalářská práce byla zvolena za účelem výzkumu možností optimalizace neutronového zdroje v laboratoři VUT FEKT v Brně. Cílem je provést návrh jednoduchého neutronového zdroje a pomocí simulace a matematických výpočtů metodou Monte Carlo zjistit, zda je možné zajistit větší efektivitu zdroje.

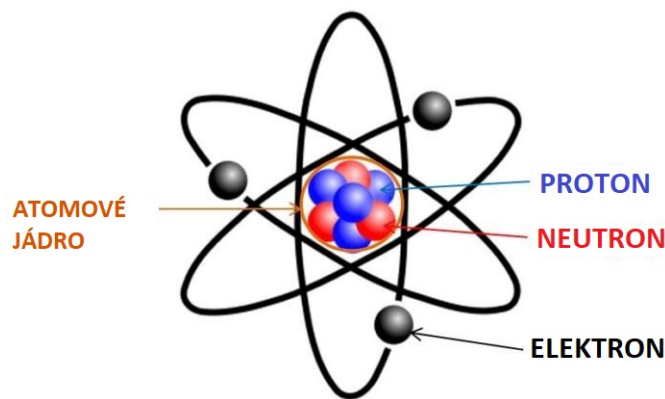
Motivací pro práci na téma neutronových zdrojů je fakt, že tyto zdroje jsou nedílnou součástí moderní vědy a výzkumu. Díky jejich využívání bylo dosaženo vývoje materiálů zejména pro jaderný průmysl a energetiku. S jejich pomocí je dosahováno neustále zvyšujících se požadavků na pevnost a odolnost materiálů vůči různým typům radioaktivnímu záření, který lze následně využít například pro zhotovení primárních okruhů jaderných elektráren.

Velmi sledovaná oblast z hlediska využití neutronů, je medicína. Využívá se izotop molybden-99 zejména pro diagnostiku srdečních chorob a rakoviny. Velkou nevýhodou bylo jeho výroba na málo místech po světě a jeho následný transport do určené nemocnice, po jehož dobu se rozpadla značná část jeho jader. Díky vývoje neutronového zdroje, ve kterém je možné vytvořit tento izotop, který je možné vytvářet přímo v nemocnicích.

Důležitým aspektem této práce je seznámit se se všemi druhy neutronových zdrojů, principem na kterém fungují a jejich další využití ve vědě a průmyslu. Téma zdrojů neutronů je v praxi velice významné, jelikož jejich využití je velmi široké. Jsou také využívány v průmyslových oblastech, jako je například výroba křemíku pro elektrotechnický průmysl, a mnoho dalších. Velmi rozsáhlé jsou v oblasti vědy, kde se pomocí neutronů zkoumají a vyvíjejí nové materiály. Proto je velice důležité, aby se lidstvo tímto tématem zabývalo a vytvářelo další pokroky v oblasti této vědy.

2 Teoretický rozbor

Při hlubším zkoumání zdrojů neutronů, je třeba vycházet ze základních znalostí oblasti jaderné fyziky, který se zabývá pohybem částic uvnitř atomových jader a zkoumá jejich přeměny, které jsou příčinou uvolňování energií. Součástí je i porozumění samotného složení atomu, jeho rozdělení na jádro a plášť a znalost částic, které se v něm vyskytují včetně příslušných vazeb. Hodláme-li zkoumat způsoby generování neutronů, je zřejmé, že pro dané téma budou klíčové vzájemné interakce jader různých atomů, kde se neutrony nacházejí nebo pouze reakce samotné částice s jádrem.



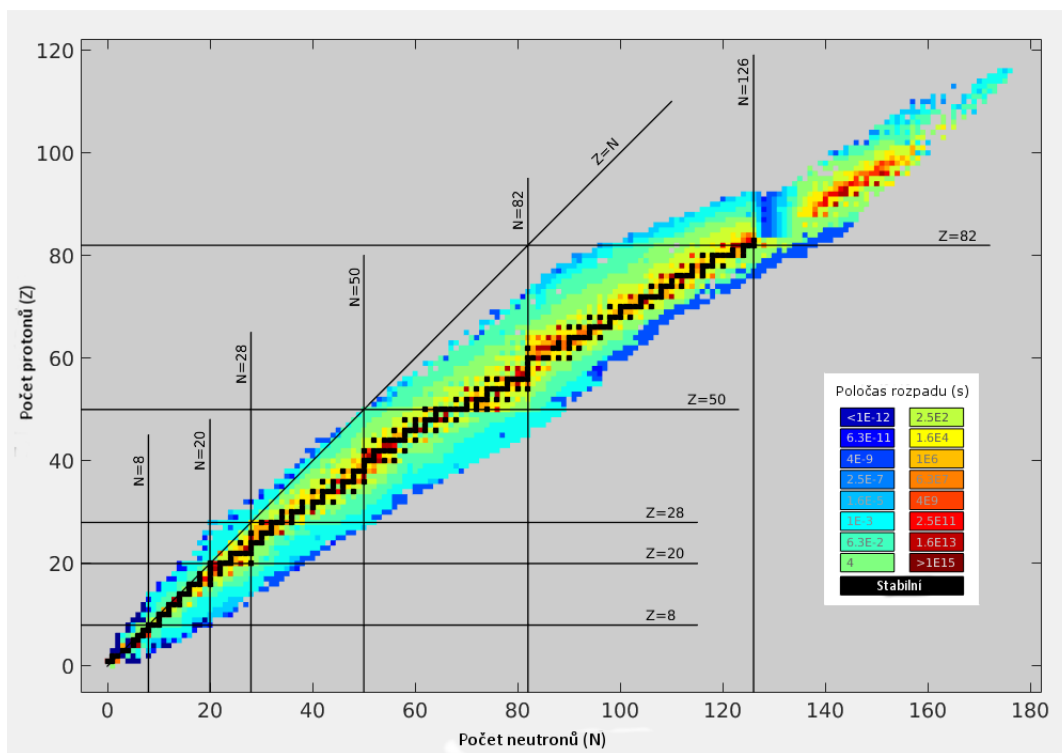
Obr. 2-1: Stavba atomu [28]

Neutron je nukleon vyskytující se v jádře atomu a na rozdíl od zbylých částic nemá žádný náboj, proto jeho interakce nemění náboj celého atomu, a i přesto má nenulový magnetický moment. Tento moment je dán spinem kvarků (ddu), ze kterých je složen. Každý kvark uvnitř nukleonu je elementárním magnetem. Neutron vázaný v atomovém jádře je stabilní částicí, naopak volný neutron je nestabilní a má střední dobu života 886 sekund, tedy o něco málo kratší než 15 minut. Různé experimenty, ale dávají odlišné hodnoty, jelikož se liší výsledky, které byly získány sledováním počtu neutronů od výsledků, které sledují produkty rozpadu. Proto se střední doba života udává s velikou odchylkou, která bere ohled na oba způsoby měření. S touto odchylkou má neutron střední dobu života t 14 minut s odchylkou 14 sekund a poločas rozpadu 10 minut. Ze všech tří částic je nejtěžší a díky jeho nábojové neutralitě proniká velkým množstvím materiálů, což je hlavní důvod jeho využití. Díky této vlastnosti lze zkoumat velké množství materiálů.

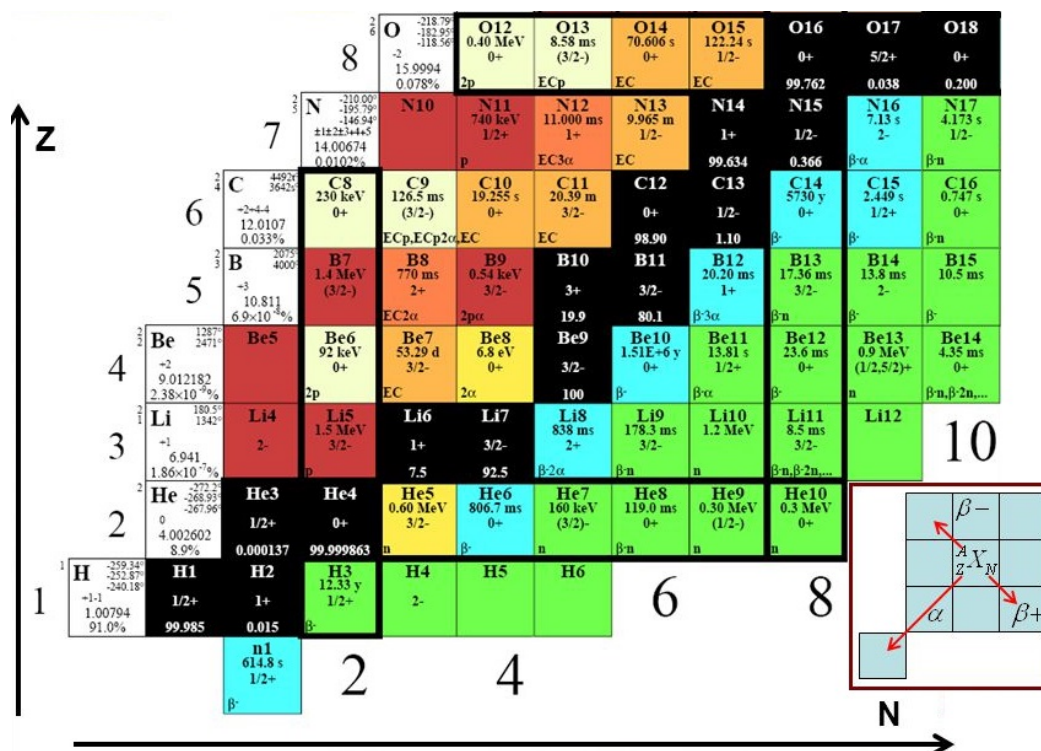
Důležitou součástí práce s neutrony je znalost možností jejich stínění, a to z důvodu ochrany před kontaktem s lidským tělem a látkami v okolí. Neutronové záření lze stínit prvky s lehkými atomovými jádry. Odstínit lze tedy například vodou s obsahem bóru, která se využívá v jaderných reaktorech pro ochranu obsluhy před neutronovým zářením nebo tlustou vrstvou betonu.

Počet neutronů a protonů v jednotlivých prvcích označuje nukleonové číslo, které také rozlišuje různé izotopy daného prvku. V přírodě se prvky vyskytují jako směs různých izotopů a na obrázku 1-2 je znázorněna celá tabulka známých nuklidů. Zde jsou vyobrazeny i přímky, které znázorňují počet protonů a neutronů v prvku. Na přímce $Z=N$, je jejich počet shodný, tedy počet neutronů v jádře se rovná počtu protonů. U lehkých prvků – až po kyslík – je vidět, že jejich stabilní izotopy (černé) kopírují tuto přímku. U těžších prvků se jejich stabilní izotopy postupně s přibývajícím hmotností odlučují od této přímky směrem vpravo. Tento fakt udává, že

prvky s vysokým hmotnostním číslem obsahují ve svém jádře velké množství neutronů. Prvky za bismutem už mají poměr neutronů v jádře tak velký, že žádný jejich izotop už není stabilní a řadí se mezi prvky radioaktivní.



Obr. 2-2: Tabulka nuklidů [16]



Obr. 2-3: Tabulka nuklidů přibližná [31]

Detailním pohledem na tabulku nuklidů na obrázku 1-3, lze vidět rozpady jednotlivých izotopů u prvků z počátku periodické soustavy. V pravém dolním rohu je znázorněn, jakým typem přeměny se daný izotop rozpadá. Konkrétně se jedná o tři typy přeměn, alfa, beta plus a beta minus.

Přeměna beta plus je druh radioaktivní přeměny, kdy proton v jádře atomu vyzáří pozitron a elektronové neutrino čímž se změní na neutron. Jelikož se přeměnou beta plus sníží protonové číslo nuklidu, objevuje se zejména u radionuklidů, které mají velký přebytek protonů. Naopak při přeměně beta minus neutron vyzáří elektron a elektronové antineutrino a následně se změní na proton. Zvýší se tak protonové číslo o jedna a vzniká prvek, který je v tabulce další v pořadí. Příkladem pro přeměnu beta minus je rozpad tritia na helium popsán v rovnici 1.1. Přeměna beta plus je znázorněna v rovnici 1.2.



Na rozdíl od bety, je přeměna alfa spontánní emisí těžké částice, které pochází z radioaktivního jádra. Probíhá tedy většinou u těžkých přirozených radionuklidů a je nejčastějším typem jejich přeměny, jelikož se tak atomy snaží dosáhnout stabilního stavu. [9] [33] [26]

3 Radionuklidové zdroje neutronů

Radionuklidové zdroje neutronů, jsou nejstarším a i nejrozšířenějším zdrojem neutronů. Pracují na principu jaderných reakcí, které vedou k emisi samotného neutronu. Jsou tvořeny radioaktivním materiálem, který emituje částice α nebo γ a terčíkovým materiálem, kde dochází k přeměně u které se emituje neutron.

Výhody těchto zdrojů jsou:

- velmi dobrá emise neutronů vzhledem k velikosti a náročnosti údržby zdroje
- malé rozměry
- dobrá údržba
- nízká cena

Nevýhody:

- nižší emise neutronů oproti velkým zdrojům (jaderné reaktory, spalační zdroje, atd.)
- široké spektrum neutronů lze upravovat jen moderací
- doprovodné záření γ

Díky jeho malé velikosti je radionuklidový zdroj vhodné použít převážně v místech, kde je potřeba jednoduchý zdroj, který je zároveň přenosný a kde je dostatečná jeho nízká emise neutronů. Takový přístroj je vhodný například pro kalibrování jiných přístrojů, pro zahájení štěpné reakce jaderných reaktorů, v osobních dozimetrech a v dalších odvětvích jako je medicína, kde se zdroj využívá při brachyterapii nádorů a také v geologii. [24]

3.1 Spontánně štěpný zdroj ^{252}Cf

Spontánní štěpení je proces, kdy se jedno těžké jádro rozdělí na dva nebo více menších fragmentů bez vnějšího vlivu. Dochází k němu hlavně u jader s atomovou hmotností vyšší než 232. Jedná se tedy o prvky, které se nachází v periodické soustavě prvků za thoriem. Výčet těch nejvyužívanějších je vypsán v tabulce 2-0 i s jejich vlastnostmi. Pravděpodobnost jestli dojde ke spontánnímu štěpení v takové době, aby bylo pozorovatelné současnými metodami, lze vypočítat pomocí matematického vzorce:

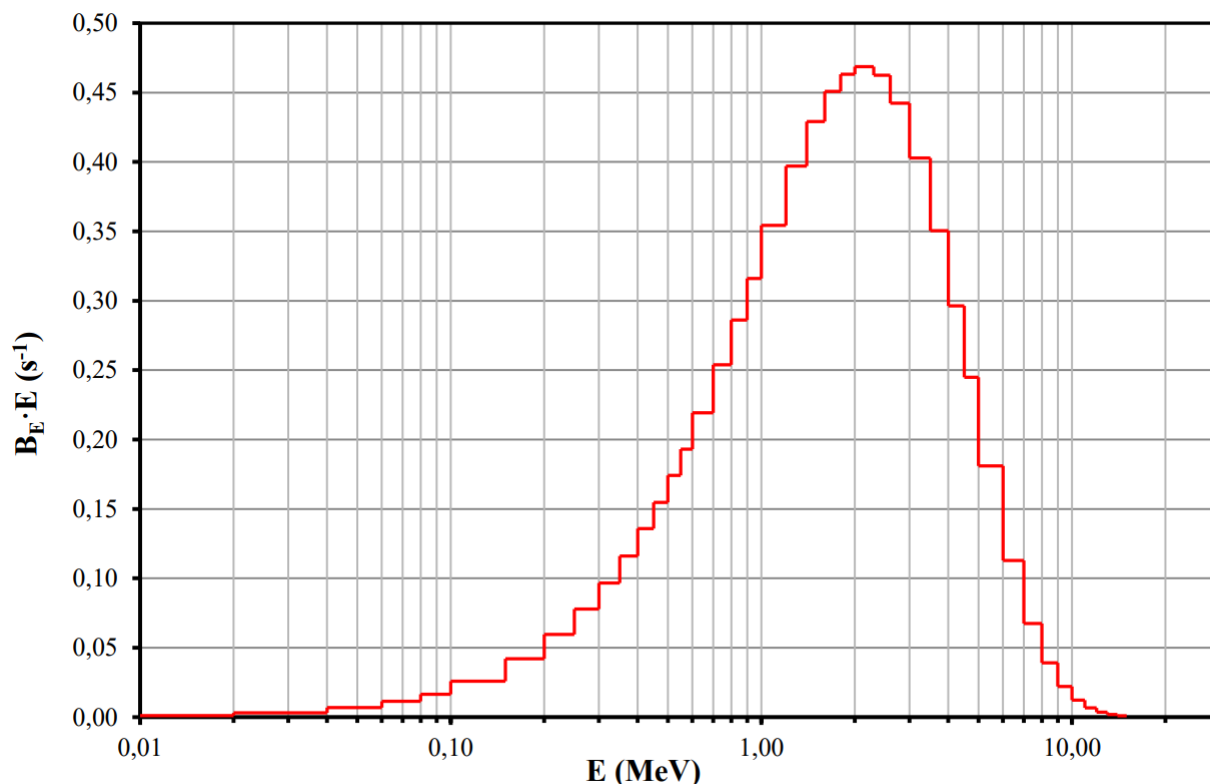
$$\frac{Z^2}{A} \geq 47$$

Z - Protonové číslo, A - Nukleonové číslo

Pro spontánně štěpný radionuklid platí určité požadavky, aby mohl být použit jako neutronový zdroj. Požaduje se co nejvyšší podíl spontánního štěpení a co nejnižší náklady na výrobu izotopu a zdroje. V tabulce 2-0 jsou vypsány často využívané prvky pro spontánní štěpení. Jedním z vhodných nuklidů, s ohledem na uvedené požadavky, je kalifornium ^{252}Cf . U zdrojů s ^{252}Cf je podíl spontánního štěpení vůči všem způsobům přeměny pouze 3,1 %, zbytek reakcí jsou alfa přeměny na ^{248}Cm . Na obrázku 2-1 je vidět neutronové spektrum. ^{252}Cf [24] [29] [21]

Tab. 3-0: Spontánně štěpné prvky

Izotop	Poločas rozpadu	Počet neutronů	Spontánní poločas rozpadu	Z^2/A
^{235}U	$7,04 \cdot 10^8 \text{let}$	1,86	$3,5 \cdot 10^{17} \text{let}$	36
^{238}U	$4,47 \cdot 10^9 \text{let}$	2,07	$8,6 \cdot 10^{15} \text{let}$	35,6
^{239}Pu	$2,41 \cdot 10^4 \text{let}$	2,16	$5,5 \cdot 10^{15} \text{let}$	37
^{240}Pu	6569 let	2,21	$1,16 \cdot 10^{11} \text{let}$	36,8
^{250}Cm	6900 let	3,31	-	36,9
^{252}Cf	2,638 let	3,73	-	38,3



Obr. 3-1: Neutronové spektrum spontánně štěpeného zdroje Cf-252 [15]

3.2 Zdroje využívající (α, n) reakci

U tohoto typu zdrojů se využívá rozpadu radioaktivního těžkého prvku alfa přeměnou, který následně emituje α záření. Nejčastěji se využívá prvek americia nebo plutonia. Vyprodukované záření následně interaguje s jádrem druhého prvku s velikou pevností a vysokou hustotou. Zde se volí lehké prvky ze začátku periodické soustavy prvků, jelikož pouze u těchto prvků má alfa záření dostatečnou energii na překonání elektrostatických sil. Nejčastěji se využívá beryllium. Rozpad ^{238}U emituje α - záření, které dopadá na ^{19}F ze kterého se po (α, n) reakci emituje jeden volný neutron.

Reakce (α, n) je velmi často využívána ve zdrojích neutronů. α -zářiče se dříve využívaly jako přirozené radionuklidy (radium, polonium). Dnes už se však ve zdrojích využívají uměle vyrobené transurany ^{241}Am , ^{238}Pu a ^{239}Pu zejména kvůli tomu, že polonium ^{210}Po má krátký poločas rozpadu a radium ^{226}Ra zase silné doprovodné γ záření. V tabulce 2-1 jsou znázorněny základní vlastnosti neutronových zdrojů využívající (α, n) reakci, kdy byl využit beryliový terčik a různé zdroje radionuklidů.[24]

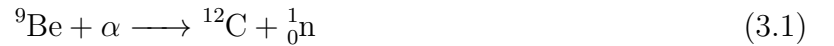
Tab. 3-1: Vlastnosti neutronových zdrojů (α, n)

Zdroj	Poločas rozpadu	E_α (MeV)	Neutronový tok ($10^6 s^{-1}$)	Podíl neutronů $E_n < 1,5 MeV$ (%)
$^{239}\text{PuBe}$	24000 let	5,14	65	11
$^{210}\text{PoBe}$	138 dní	5,30	73	13
$^{238}\text{PuBe}$	87,4 let	5,48	79	-
$^{241}\text{AmBe}$	433 let	5,48	82	14
$^{244}\text{CmBe}$	18 let	5,79	100	18
$^{242}\text{CmBe}$	162 dní	6,10	118	22
$^{226}\text{RaBe}$	1602 let	více hodnot	502	26
$^{227}\text{PuBe}$	21,6 let	více hodnot	702	28

Nejdůležitějšími parametry pro volbu primárního záření α jsou poločas rozpadu a doprovodné γ záření. Při krátkém poločasu přeměny, s přibývajícím časem se snižuje emise neutronů ve zdroji a musí se provádět jeho korekce. Tím pádem je jeho využitelnost omezená. V opačném případě, kdy je poločas přeměny dlouhý, měrná aktivita zdroje je nízká. Tuto nízkou aktivitu musíme kompenzovat zvyšováním rozměrů zdroje.

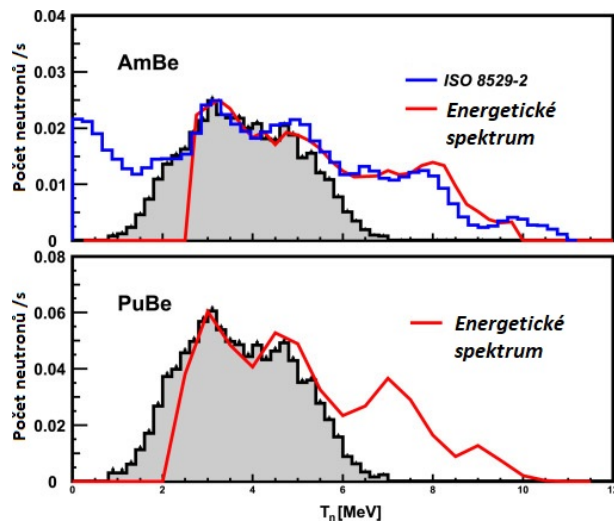
Doprovodné γ záření je ve velkém množství nežádoucí, jelikož způsobuje pozadí v některých detektorech a radiační poškození materiálu.

V rovnici (2.1) je znázorněna emise neutronu pomocí beryliového terčíku. [24]



S rostoucí energií α částic výtěžek zdroje roste. Jelikož se však většina α částic v terčíku zastaví, je výtěžek (α, n) zdrojů nízký. Příčinou zastavení částic je elektromagnetická interakce s elektrony v atomových obalech. [24]

Obrázek 2-2 zobrazuje pokus, který porovnává rozdíl spektra mezi AmBe a PuBe neutronovým zdrojem. Výsledek testu ukazuje, že kombinace plutonia s beryliem, generuje vyšší neutronový tok než AmBe zdroj.



Obr. 3-2: Neutronová spektra AmBe a PuBe zdroje [17]

3.3 Radionuklidové zdroje na bázi (γ , n)

Princip funkce zdrojů s gama zařením, je podobný jako u zdrojů využívající záření alfa. Jedná se tedy o zdroj fotonů a terčový materiál, kterým je zde deuterium ^2H a beryllium ^9Be . Deuteriový terčík je realizován jako těžká voda nebo polyetylen, který obsahuje atomy deuteria.

Důvodem využití těchto reakcí je dostatečně nízká vazebná energie neutronu na to, aby mohla být reakce indukována fotony vznikajícími radioaktivní přeměnou izotopů s dostatečně dlouhým poločasem přeměny kvůli životnosti zdroje.

Tyto zdroje jsou využívány velice výjimečně a to kvůli jejich velmi nízké emisí neutronů. I zde probíhá kombinace radionuklidu s terčickým materiálem. využívají se především vodík a beryllium. Jejich reakce jsou znázorněny v rovnicích (2.2) a (2.3). Charakteristické pro tyto zdroje je, že jejich spektrum je téměř monoenergetické z důvodu jejich diskrétního spektra fotonů emitovaných při přeměně. [24]



Tab. 3-2: Vlastnosti neutronových zdrojů (γ, n)

Zdroj	Poločas rozpadu	E_γ (MeV)	Výtěžek neutronů ($10^6 s^{-1}$)
^{88}YBe	106,6 dní	0,15- 0,95	2,7
$^{88}\text{Y}^2\text{H}_2\text{O}$	106,6 dní	0,25	0,08
$^{226}\text{RaBe}$	1600 let	0,12 0,51	0,8
$^{226}\text{Ra}^2\text{H}_2\text{O}$	1600 let	0,12	0,03
$^{228}\text{RaBe}$	5,75 let	0,83	0,9
$^{228}\text{Ra}^2\text{H}_2\text{O}$	5,75 let	0,2	2,6
$^{124}\text{SbBe}$	60,2 dní	0,024	5,1

4 Jaderný reaktor

Jaderný reaktor je zařízení, které využívá interakci neutronů s jádry atomů paliva uvnitř aktivní zóny, za účelem zisku požadovaného finálního produktu. Požadovaný produkt z reakce určuje typ reaktoru a důvod, kvůli kterému byl postaven. Jeden z typu jaderného reaktoru je budován pro energetické účely. U tohoto reaktoru je požadovaným výstupem z jaderné reakce teplo, které ohřívá vodu v aktivní zóně jaderné elektrárny.

Dalším typem jaderných reaktorů je reaktor výzkumný. Výzkumný jaderný reaktor je reaktor, který je převážně využíván jako zdroj neutronů. Od energetických reaktorů se liší tím, že nejsou budovány za účelem výroby elektrické energie. Z tohoto důvodu jejich výkon nedosahuje takových hodnot, jako je u reaktorů energetických, kde se pohybuje v tisících MWe, zatím co u výzkumných reaktorů se hodnoty pohybují v řádech kWe až jednotek MWe.

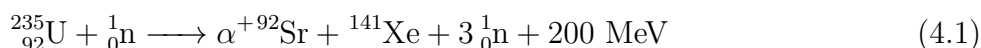
Nejdůležitější složkou v jeho neutronovém poli jsou okamžité neutrony, které se uvolňují přímo při jaderném štěpení nebo méně než 10^{-10} sekund po něm. Počet zpožděných neutronů je menší než 1 % z celého pole neutronů. Stejně malý je i podíl neutronů z fotojaderných reakcí. Jaderný reaktor má velký potenciál pro využití jako neutronový zdroj a to vzhledem k faktu, že je to největší zdroj neutronů, který existuje. Při tomto tvrzení se neberou v úvahu jaderné výbuchy, kde vzniká enormní množství neutronů. V aktivní zóně reaktoru se vyskytuje řádově 10^{17} až 10^{19} neutronů za vteřinu.

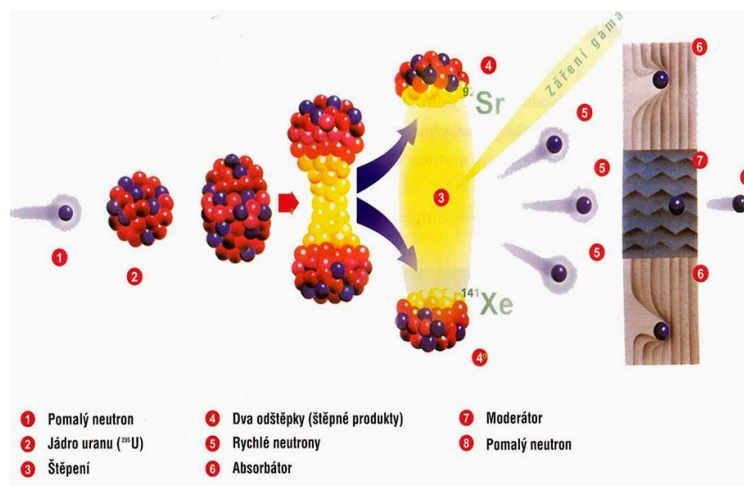
Energetické reaktory obvykle nejsou doplněny o ozařovací kanály a únik neutronů je u nich nežádoucí. Zatímco u reaktorů experimentálních je tento jev chtěný, jelikož neutrony směřují k jednotlivým experimentům, které jsou umístěny mimo aktivní zónu reaktoru. [24] [10] [8]

4.1 Jádro atomu a jeho štěpení

Interakce jádra atomu s neutronem, se nazývá jaderné štěpení. Při jaderném štěpení vzniká velké množství tepelné energie (200 MeV), která má zejména v průmyslu velké využití. V jaderných elektrárnách se tato energie využívá k přeměně vody na páru, která je následně využita k roztáčení turbíny s generátorem a výrobě elektrické energie.

Neutron naráží do jádra paliva v reaktoru – nejčastěji obohacený Uran $^{235}_{92}\text{U}$ – a rozštěpí jej na dva menší štěpné produkty, ze kterých emituje jeden až tři další neutrony, které jsou použitelné pro další štěpnou reakci. Při této reakci vzniká velké množství tepelné energie. V obrázku 3-1 je znázorněno, jak takové štěpení probíhá a v rovnici (3.1) je uveden jeden z možných průběhů štěpení ^{235}U .





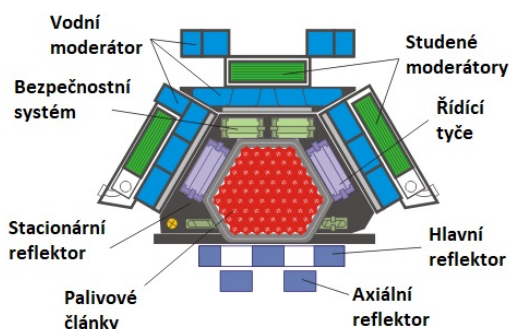
Obr. 4-1: Štěpení uranu [19]

4.2 Výzkumné jaderné reaktory

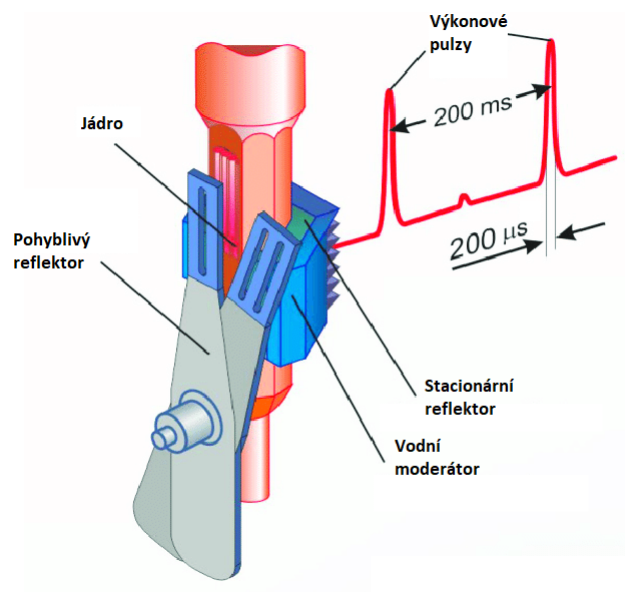
Ve světě se vyskytuje několik typů výzkumných jaderných reaktorů, které jsou především využívány k výzkumu, testování materiálů a pokusům, u kterých je třeba využít silný neutronový zdroj. V následujících kapitolách jsou popsány ty nejzajímavější reaktory z hlediska jejich výkonu, provedení a experimentů, které se na nich testují.

4.2.1 Reaktor IBR-2

Jaderný reaktor IBR-2 se nachází ve Spojeném Ústavu pro jaderný výzkum (Frank Laboratory of Neutron Physics) v Ruském městě Dubna. Do provozu byl uveden v roce 1984 a dosahuje výkonu 2 MW. V letech 2006-2011 byl rekonstruován. Aktivní zóna je ve tvaru nepravidelného hexagonu a jako palivo se zde využívá oxid plutoničitý (PuO_2). Reaktor je chlazen sodíkem a pracuje na rychlých neutronech. Unikátním znakem reaktoru je periodická modulace reaktivity díky rotaci dvou reflektorů, které lze vidět na obrázku 3-3. Tyto reflektory rotují vzájemně opačným směrem různou rychlostí. V okamžiku, kdy se oba reflektory k sobě u aktivní části přiblíží, generuje se výkonový impuls. Díky specifickému technickému řešení disponuje reaktor jedním z nejintenzivnějších neutronových toků, až 10^{16} neutronů na cm^2 za vteřinu s pulzem výkonu 1850 MW. [11]

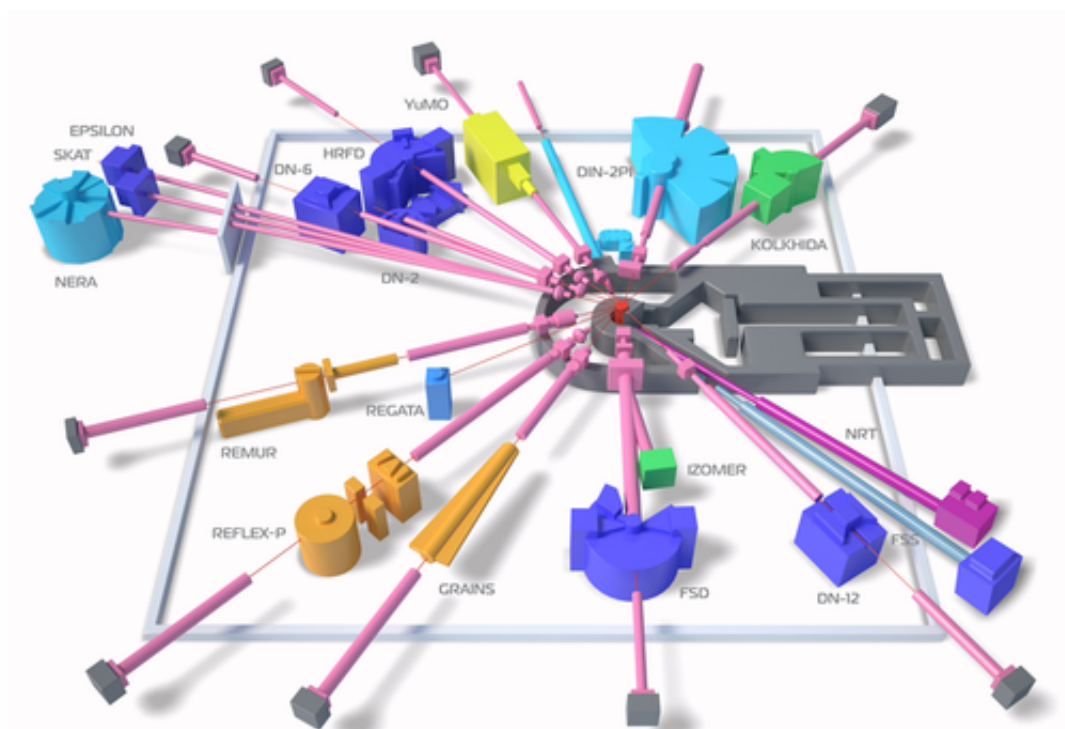


Obr. 4-2: Reaktor IBR-2 [27]



Obr. 4-3: Pohyblivé reflektory [27]

Po modernizaci reaktoru IBR-2 byl kolem jádra nainstalován moderátor na bázi aromatických hydrokarbonů, kde rychlé neutrony z reaktoru ztrácejí svoji energii, díky nimž jsou pak lépe využitelné v jednotlivých experimentech. Komora moderátoru je naplněna uhlovodíkovými peletami o průměru 3,5 mm s provozní teplotou 30 K, která je udržována plyným héliem, cirkulujícím komorou. Pelety moderátoru jsou po desetidenním cyklu rozpuštěny a vyměněny za nové. Byla také navýšena kapacita spektrometrů a to až na počet 14. [11]

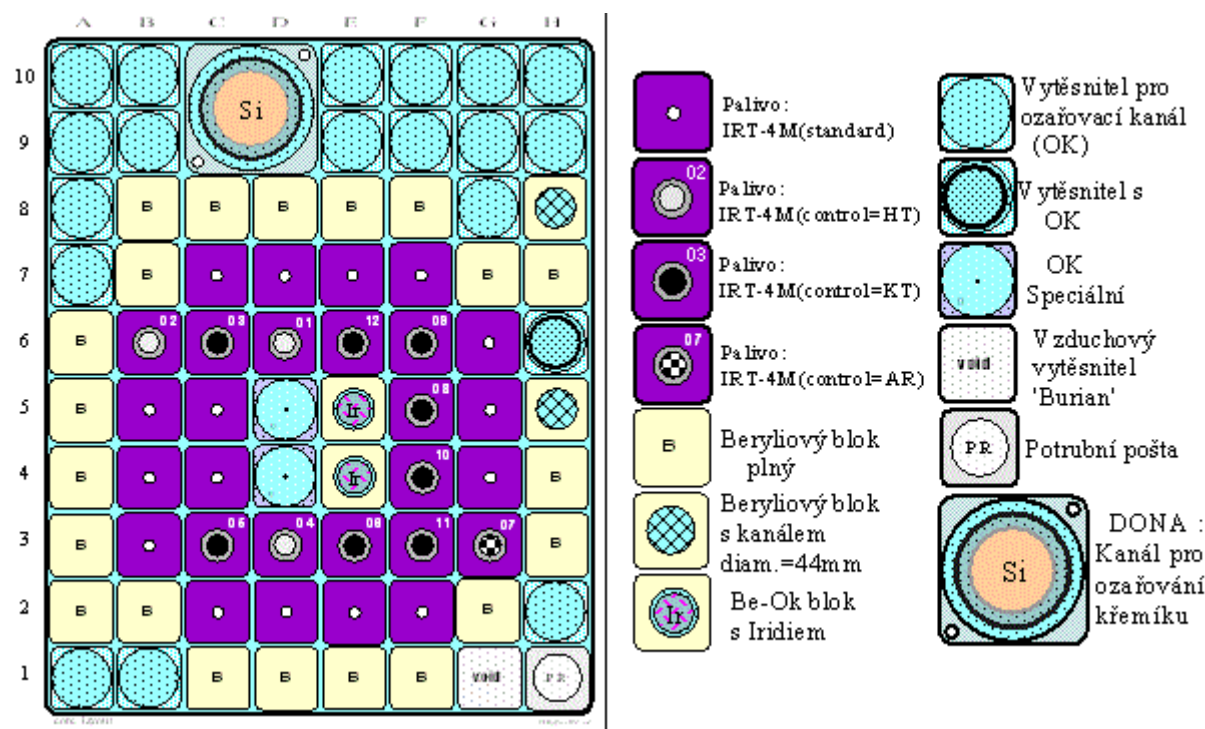


Obr. 4-4: Spektrometry okolo IBR-2 [27]

4.2.2 Reaktor LVR-15

LVR-15 je výzkumný reaktor na území ČR provozován společností ÚJV Řež a.s. Výstavba byla zahájena v roce 1955 pod označením VVR-S a do provozu byl spuštěn 24. 9. 1957. Tepelný výkon se pohyboval okolo 2 MWt a sloužil jako víceúčelové výzkumné zařízení pro československý jaderný program. Reaktor byl využíván převážně k výrobě izotopů, ozařování materiálů a výzkum v oblasti reaktorové fyziky. V roce 1964 proběhlo navýšení tepelného výkonu na hodnotu 4 MWt a v roce 1989 proběhla významná rekonstrukce celého reaktoru, včetně jeho nádoby. Po rekonstrukci se začalo využívat vysoce obohacené palivo IRT-2M a výkon reaktoru byl opět navýšen na hodnotu 8 MWt. Po roce 1994 proběhlo ještě jedno navýšení na hodnotu 10 MWt a také byla změněna kampaň na 3 týdenní. V 90-tých letech také proběhly významné navýšení experimentálních schopností reaktoru. Díky vybudování experimentálních smyček, se podařilo napodobit podmínky v reaktorech PWR a BWR. Z tohoto důvodu zde od té doby probíhají zkoušky konstrukčních materiálů v reálných podmínkách. V roce 1995 proběhl návrat k nízko obohacenému palivu (36%).

Dnes patří reaktor LVR-15 mezi několik reaktorů středního výkonu v Evropě. Probíhá zde materiálový výzkum, jako jsou korozní zkoušky materiálů v primárních okruzích. Testují se zde vodní režimy primárního okruhu, vyvíjí se nové radiofarmaceutické preparáty. Pro elektrotechnický průmysl se zde vyrábí radiačně dopovaný křemík. Reaktor také slouží pro neutronovou aktivační analýzu, ozařovací servis a další různé výzkumy. Od roku 2000 patří k pracovištím na světě, které se zabývají výzkumem neutronové záchytové terapie nádorových onemocnění mozku včetně použití na skutečných pacientech. [38]



Obr. 4-5: Aktivní zóna reaktoru LVR-15 [22]

Reaktor LVR-15 je využíván zejména pro výzkumy v těchto oblastech:

- Materiálový výzkum, např. ozařování materiálů tlakové nádoby reaktoru (TNR),
- korozní zkoušky materiálů primárního okruhu a vnitřních vestaveb reaktoru prováděné v experimentálních smyčkách a sondách,
- testy vodních režimů primárních okruhů jaderných elektráren
- neutronová aktivační analýza (používaná ke stanovení složení látek),
- výroba a vývoj nových radiofarmak (^{153}Sm , ^{161}Tb , ^{165}Dy , ^{166}Ho , ^{169}Er , ^{60}Co , ^{192}Ir , ^{182}Ta , ^{198}Au),
- výroba polovodičů neutronovým legováním křemíku pro elektrotechnický průmysl (dopování křemíku fosforem s využitím ozařování neutrony výrazně zlepšuje měrný elektrický odpor oproti jiným metodám),
- ozařovací služby (výroba radioizotopů – ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{113}Sn - $^{113\text{m}}\text{In}$, ^{188}W - ^{169}Re),
- základní výzkum vlastností materiálů na horizontálních kanálech (neutronová fyzika a fyzika pevné fáze),
- neutronová záchytová terapie (využití svazku epitermálních neutronů pro lékařské účely).

Svazky neutronů z reaktoru, které jsou vyvedeny horizontálními kanály, využívají vědečtí pracovníci z Ústavu jaderné fyziky AV ČR, v.v.i. a FJFI ČVUT pro následující experimenty:

- Neutronové měření struktur a textur při normálních, vysokých i velmi nízkých teplotách,
- neutronové hloubkové profilování, studium okamžitého záření gama z radiačního zachytu neutronů,
- neutronová optika, neutronová topografie,
- měření textur v polykrystalických kovových materiálech,
- studium strukturálních nehomogenit metodou difrakce, malouhlového rozptylu neutronů,
- neutronová interferometrie,
- studium lokálních napětí v polykrystalických materiálech.

4.2.3 Reaktor LR-0

Je lehkovodní reaktor nulového výkonu, který se také nachází v ÚJV Řež. Pochází z předešlého těžkovodního reaktoru TR-0, který byl uveden do provozu 21.6.1972 a sloužil k výzkumu aktivní zóny energetického reaktoru v Jaslovských Bohunicích až do roku 1979. V tomto roce byl, díky přechodu československého jaderného programu na koncepci lehkovodních reaktorů, přebudován na lehkovodní reaktor nulového výkonu s označením LR-0. Takto přebudovaný reaktor byl uveden do provozu v roce 1983. Jsou zde použity zkrácené palivové kazety z reaktorů VVER-1000 a VVER-440 a dosahuje maximálního tepelného výkonu 5kWt. Provádí se na něm výzkum aktivních zón, modelování neutronových polí v energetických reaktorech. [38]

5 Spalační zdroj neutronů

Spalační zdroje neutronů pracují na principu tříštění těžkých jader (spalace). Spalace je druh reakce, kdy částice s vysokou energií (často vyšší než 0,5 GeV) naráží do atomu těžkého prvku a tím uvolní velké množství neutronů. Tyto neutrony jsou urychleny v urychlovači částic až na hodnotu jednotek GeV a následně narazí na terč, z tvrdého materiálu o vysoké hustotě, jako je wolfram nebo rtuť. Zde se z každého jádra prvku, který neutron zasáhne, uvolní několik desítek neutronů s vysokou energií. Ty pak mohou být zpomalovány průchodem skrze moderátor – nejčastěji voda a kapalný vodík –, který zpomalí neutrony po cestě k danému experimentu a sníží tak svoji energii na velikost vhodnou ke zkoumání nebo může být k experimentu přiveden neutron, aniž by byl předem moderován. Mapa na obrázku 4-1 ukazuje výskyt těchto zdrojů ve světě. [6][36]



Obr. 5-1: Mapa výskytu spalačních zdrojů.

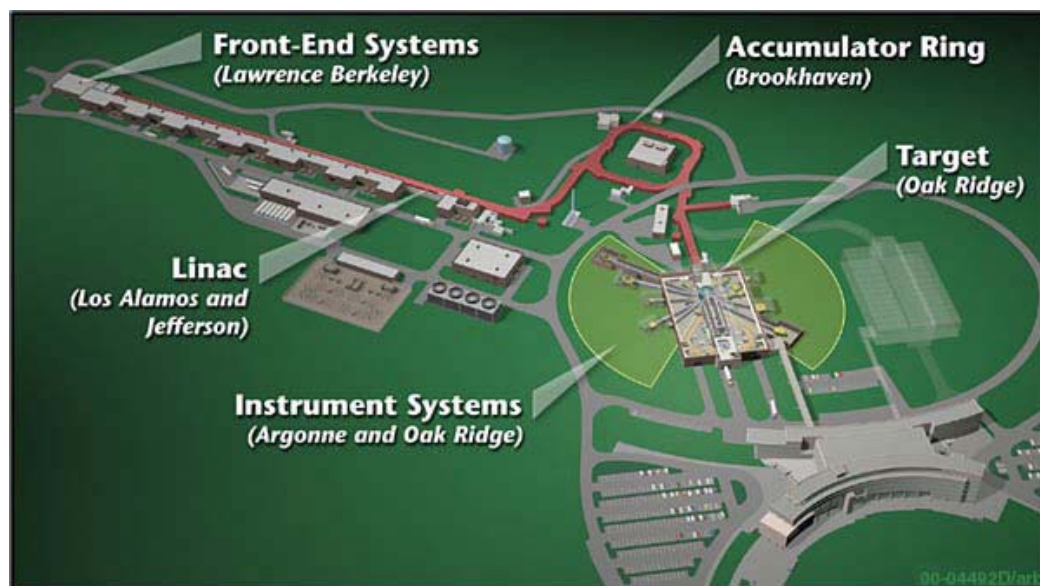
5.1 Evropský spalační zdroj

Nejsilnější neutronový zdroj na světě se buduje ve Švédském městě Lund. Jeho otevření bylo plánováno na rok 2019. Aktuálně je hotov ze 64 % a uveden do provozu by měl být v roce 2022. V roce 2023 by měl být zahájen uživatelský program. Celý projekt má označení ESS (European Spallation Source) a bude využívat vysoce výkonný pulzní zdroj neutronů. Tento zdroj bude produkovat třicetkrát intenzivnější svazky neutronů (5 MW) než-li stávající neutronové zdroje. V případě ESS budou protony urychleny v 600 m dlouhém lineárním urychlovači na energii 2 GeV a poté narazí na wolframový terč, kde z každého zasaženého jádra wolframu uvolní desítky neutronů s vysokou energií. Neutrony dále projdou moderátory tvořenými vodou a kapalným vodíkem, kde se zpomalí na energii potřebnou pro výzkum, srovnatelnou s běžnou

energií tepelných pohybů atomů. Svazky vzniklých neutronů jsou pak vedeny k měřícím stanicím, kterých zde bude 22. Každá z těchto stanic je speciálně navržena pro určitý typ experimentu podle vlastností zkoumaných látek. [36]

5.2 Spalační neutronový zdroj

Je spalační zdroj poblíž města Oak Ridge v USA. V ORNL (Oak Ridge Neutron Laboratory) se nachází dva z nejsilnějších zdrojů neutronů na světě. Pracuje na stejném principu jako ESS. Urychlené protony, které následně narážejí na hmotu o velké hustotě, ze které jsou následně emitovány volné neutrony. Do provozu byl uveden v roce 2006 a do vybudování Evropského spalačního zdroje je nejsilnějším na světě. Ionty jsou zde injektovány do urychlovače, který je urychluje na energii 1 GeV. Ty následně prochází fólií, kde strhávají dva elektrony, a samostatné protony pokračují do prstencové struktury, kde se ve skupinách shromažďují. Každá skupina je uvolněna, čímž vznikají pulzy o frekvenci 60 Hz. Tyto pulzy následně zasahují cíl, kterým je zde kapalná rtuť a dochází ke spalaci. Vzniklé neutrony jsou moderovány a následně pokračují do přístrojů, kde jsou využívány k experimentům. [20]



Obr. 5-2: Spalační zdroj neutronů Oak Ridge, USA [5]

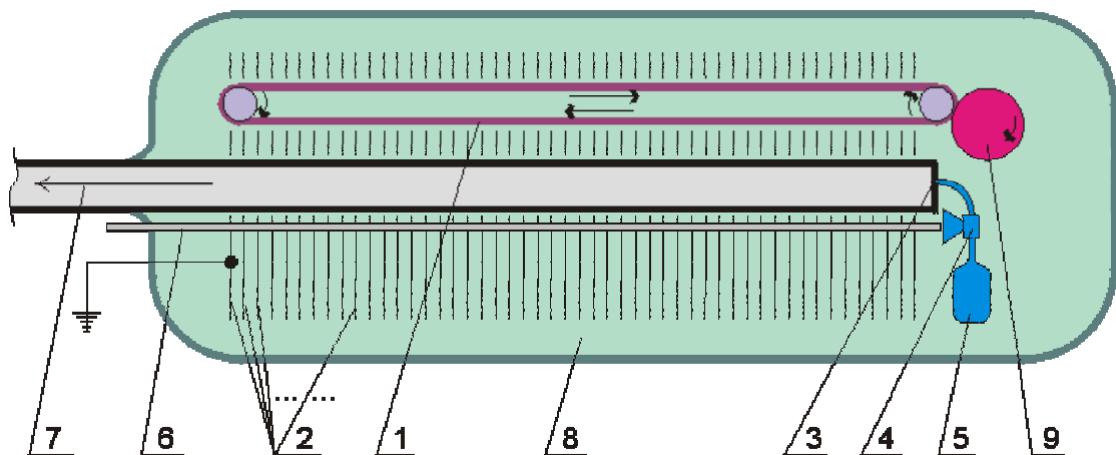
6 Urychlovače nabitých částic

Urychlovače nabitých částic jsou přístroje nezbytné ke zkoumání fyzikálních jevů v částicové fyzice. Jsou tedy velmi přínosné i pro studium a zkoumání jaderných reakcí a přípravu umělých radioizotopů, které se využívají v analytice, medicíně a biologii.

Základním rozdělením těchto urychlovačů závisí na pohybu urychlovaných částic. Dělí se na cyklické a lineární a podle fyzikálního principu činnosti na vysokofrekvenční a elektrostatické. [37]

6.1 Elektrostatické lineární urychlovače

Tento urychlovač pracuje na principu využití statických elektrických polí. Tento způsob urychlování částic je principiálně nejjednodušší. Zdrojem napětí je například Van de Graaffův generátor, který vytvoří náboj, který se přenáší pásem na vysokonapěťovou elektrodu, která je spojena s urychlovací trubicí. Mezi napětí je určena elektrickou pevností okolí. Z tohoto důvodu se generátor plní vhodným plynem pod vysokým tlakem. Maximální energie urychlovače je řádově 10 MeV. Jednou z hlavních výhod je, že nabité částice zde mají stejnou a přesně definovanou energii s vysokou stabilitou. [37]



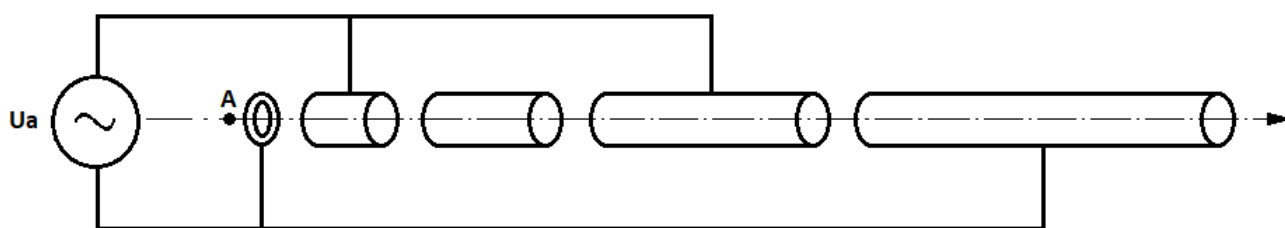
Obr. 6-1: Van de Graaffův urychlovač

1. Pohyblivý pás 2. Urychlené elektrony 3. Vstřikovač částic 4. Regulační ventil 5. Zdroj plynu 6. Ovládací tyč 7. Urychlená částice 8. Izolační atmosféra 9. elektronový generátor

6.2 Vysokofrekvenční lineární urychlovače s elektrodami

Napětí vytváří elektrické pole v prostoru mezi sousedními elektrodami. Směr elektrického pole se v daném okamžiku střídá a uvnitř elektrod je prakticky nulové. Částice se urychluje elektrickým polem v mezeře mezi elektrodami a proto je jejich délka volena tak, aby se za dobu průletu částice, vždy změnila polarita napětí zdroje.

Tento typ urychlovače generuje částice o energii větší než 20 GeV. Jeden takový se nachází ve stanfordském středisku poblíž San Franciska v USA. Stanfordské středisko SLAC využívá urychlovač, kde se dosahuje energií až 50 GeV. Dosahuje délky 3218 metrů a urychluje pozitrony a elektrony, které jsou následně využívány k dalšímu výzkumu. [37]



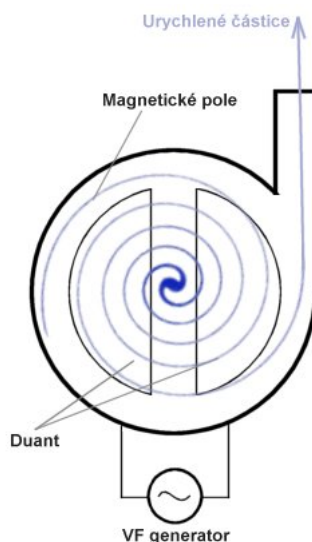
Obr. 6-2: Schéma lineárního urychlovače s elektrodami

6.3 Cyklické urychlovače - Betatron

Betatron je cyklický urychlovač částic pracující na principu magnetické indukce. Urychlovací trubice je umístěna uprostřed jádra magnetu s vinutím a elektrony jsou urychlovány silou elektromagnetické indukce. Aby v Betatronu byla stabilní dráha, je nutné, aby byla splněna Wideroevova podmínka. Střední hodnota magnetické indukce na dráze musí být rovna polovině střední hodnoty magnetické indukce na ploše ohraničené trajektorií částice. Částice v Betatronu dosahují energie do 50 MeV. [37]

6.4 Cyklické urychlovače - Cyklotron

Cyklotron je sestaven ze dvou elektrod (duantu) půlkruhovitěho tvaru, které jsou umístěné v magnetickém poli. Homogenní magnetické pole udržuje částice na spirálové dráze, které jsou urychlovány vysokofrekvenčním polem mezi elektrodami. Schéma Cyklotronu je znázorněno na obrázku 5-3. [37]



Obr. 6-3: Schéma Cyklotronu [4]

6.5 Cyklické urychlovače - Fázotron

Fázotron je cyklotron s proměnnou periodou urychlujícího napětí. Jeho výhodou oproti cyklotronu je velikost urychlujícího napětí, která je 10 keV. Oproti cyklotronu je to desetina a částice

na něm urychlené mají přesto mnohem větší energii. Vzhledem k měnící se periodě elektrického pole, se ale částice urychlují tehdy, až pokud perioda oběhu je shodná s periodou napětí. Dávka částic bude využita, jakmile dosáhne maximální energie a celý cyklus se opakuje. Jeden Fázotron byl vybudován v SÚJV Dubna. Jeho magnet má hmotnost 7000 tun, objem odčerpávaného prostoru je 35 kubických metrů a protony zde dosahují energie 680 Mev. [37] [34]

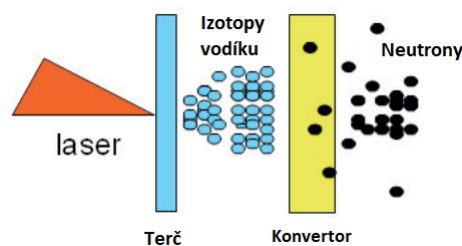
6.6 Laserové zdroje neutronů

Laserové zdroje pracují na principu akcelerace elektronů. Elektrony s vysokou energií interagují s terčem, kde je vytvářeno gama záření k následnému vyvolání jaderné reakce. V současné době jsou velké laserové laboratoře schopny produkovat 10^{10} neutronů obsažené v jednom pulzu, zatímco stolní systémy generují neutrony v řádu 10^6 . Výhodou těchto zdrojů jsou velmi směrové a krátké neutronové impulzy a levný a kompaktní systém. S příchodem technologie Chirped Pulse Amplification (CPA), jsou lasery schopné poskytovat intenzity výrazně vyšší než 10^{18} W/cm^2 .

To, jak lasery dosahují těchto intenzit, nám umožňuje rozlišovat dva druhy systémů. Na jedné straně jsou takzvané stolní lasery, které jsou založeny na velmi krátkých pulzech v rozmezí 10-15 sekund a pár Jouleů energie. Tyto systémy díky jejich malé velikosti mohou být instalovány v místnosti a jsou využívány například v malých výzkumných centrech či univerzitách. Na druhé straně existují velké laserové infrastruktury, které dodávají stovky Jouleů energie na jeden pulz v pikosekundě nebo nanosekundě. Tato zařízení dosahují velikosti desítek metrů. V současnosti se počítá s celkem 65 zařízeními po celém světě. Existují různé procesy pro akceleraci elektronů. Například:

1. Laser breakout afterburner, Yin 2007
2. Přímá Coulombova exploze, Bulanov 2002
3. Akcelerace radiačního tlaku (RPA - Radiation Pressure Acceleration), Henig 2009
4. Urychlovač s terčem (TNSA - Target Normal Shear Acceleration), Borghesi 2006

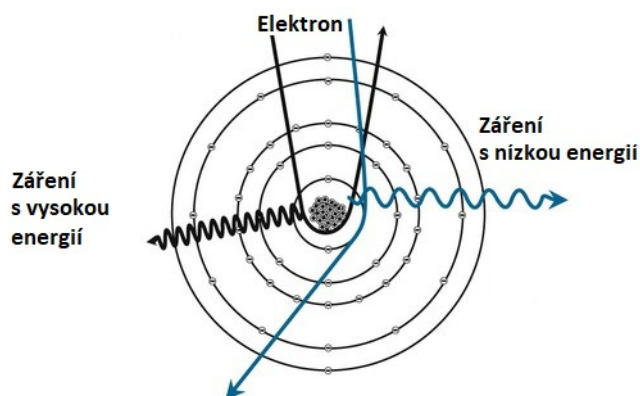
TNSA je jedna z nejpoužívanějších technologií pro iontovou akceleraci, díky nízkým experimentálním požadavkům. Ultraintenzivní laserový puls mířící na pevný terč, urychluje elektrony na relativistické energie a vytváří tak elektrostatické pole na přední i zadní straně jeho povrchu. Ionty jsou nadále urychlovány z terčíku. Ionty urychlené ze zadní plochy jsou preferovanější díky lepším vlastnostem paprsku. Na obrázku 5-4 je nakresleno schéma laserového neutronového zdroje. [7]



Obr. 6-4: Laserový zdroj neutronů [14]

7 Fotojaderné zdroje

Fotojaderné zdroje využívají elektronů, urychlených na vysokou energii. Takto urychlené elektrony interagují s terčem, který obsahuje materiál z těžkého kovu o vysoké hustotě. Často využívané materiály jsou například tantal či wolfram. V tomto materiálu urychlený elektron vlivem odlišných elektrostatických nábojů oproti jádru atomu terče mění svojí trajektorii a tím ztrácí svojí energii a zpomaluje (zbrzdí) se. Energie, kterou elektron díky zbrždění ztratí, se v důsledku zákona zachování energie přemění v elektromagnetické záření. Vzniká tedy brzdné záření (Bremsstrahlung). Jelikož elektrony dopadající na terč mají vysokou energii, vzniklé brzdné záření dosahuje energie záření gama, tedy energii větší než 10 keV. Vznik brzdného záření je znázorněno na obrázku 6-1.

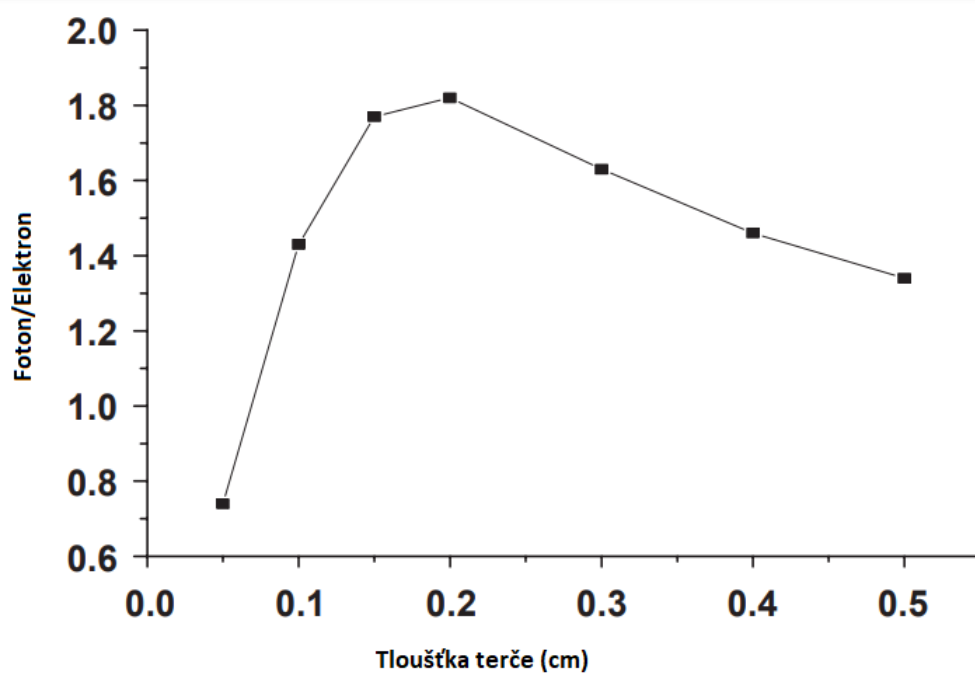


Obr. 7-1: Brzdné záření [3]

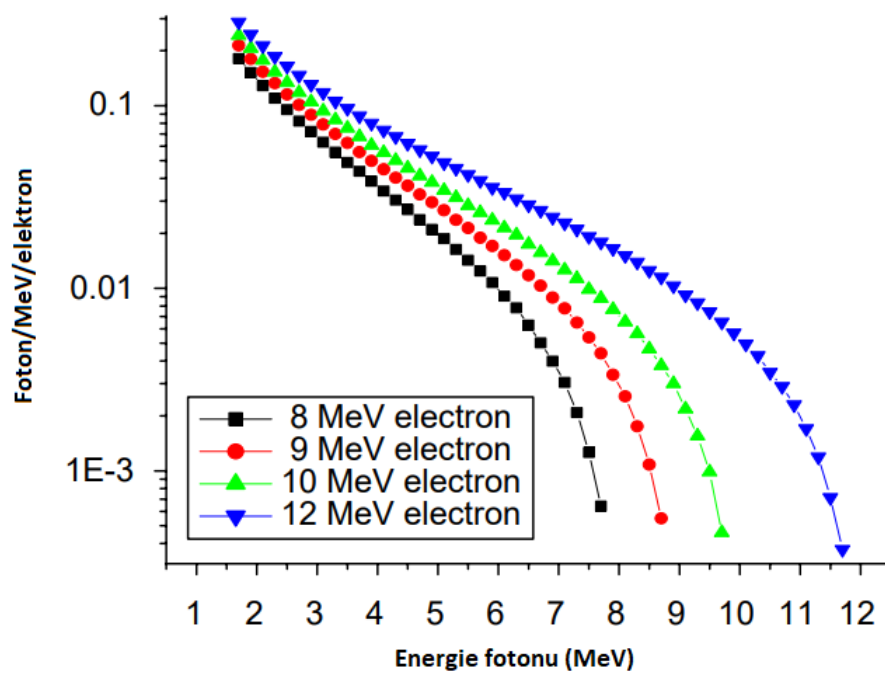
Volba vstupní energie elektronu směřujícího na terčik se volí vzhledem k materiálu, ze kterého je terčik zhotoven. Materiál musí být z prvku s vysokým protonovým číslem, aby co nejvíce zbrzdil dopadající elektrony. Například tantal pro který je potřeba přivést elektron s energií 9 MeV. Vygenerované gama záření je následně směrováno na konvertor. Zde již probíhá reakce podobná jako u radionuklidových zdrojů (γ , n), zmíněných ve 2. kapitole. Využívá se nejčastěji kombinace wolframu a beryllia s rozdílem, že zde je důležité brát ohled na úhel, pod kterým záření dopadá na terč. Testy bylo zjištěno, že záření dopadající pod nulovým úhlem – tedy kolmo na terč – generuje více neutronů, než-li záření dopadající pod větším úhlem. Dochází tak k minimálnímu „obtékání“ elektronů okolo terčíku, takže většina z nich s jádry atomů interagují. Z tohoto důvodu je emise neutronů větší.

Brzdné záření také závisí na tloušťce terčikového materiálu a tato závislost je znázorněna na obrázku 6-2.

Na obrázku je vidět, že pro efektivní zisk záření, je nutné zvolit správnou tloušťku terče, se kterým budou elektrony konfontovány. Pro případ tantalu je nejvhodnější hodnota 0,2 cm. [12]



Obr. 7-2: Brzdné záření v závislosti na tloušťce terče (pro tantal), [18]



Obr. 7-3: Spektrum brzdného záření (pro tantal) [18]

8 Terčové materiály

Jak již bylo řečeno, neutronové zdroje s urychlovači využívají terčů, které jsou bombardovány částicím vysoké energie. Interakcí těchto částic s atomy terčového materiálu dochází k jaderným reakcím uvnitř terče. Výsledkem těchto reakcí jsou svazky neutronů, které se dělí na dvě skupiny. První skupinou jsou monoenergetické neutronové svazky, které jsou vhodné pro aplikaci, kde je důležité znát energii neutronů. Druhou skupinou jsou svazky neutronů se širokým spojitým spektrem. Tyto neutrony jsou vhodné pro využití v aplikacích založených na intenzivních ozařovacích experimentech.

U zdrojů neutronů je velmi často využíván jako terčový materiál beryllium a lithium, díky svým vlastnostem. Bombardováním těchto materiálů protony nebo deuterony, vznikají na beryliu reakce $\text{Be}(p,n)$ a $\text{Be}(d,n)$. U lithia je častou reakcí $\text{Li}(d,n)$. Monoenergetické zdroje neutronů využívají nejvíce reakcí $\text{Li}(p,n)$, $\text{T}(d,n)$, $\text{D}(d,n)$ a $\text{T}(p,n)$. [39]

8.1 Reakce $p + D$

Při reakce $p + D$ dochází k troj částicové interakci $D(p, n)2p$, viz tabulka 7-0. Dochází při ní k intenzivní interakci mezi p - p párem, která zvyšuje pravděpodobnost emise neutronu o nízké energii. Tím ovlivňuje vlastnosti účinného průřezu reakce a určuje tvar charakteristiky spektra, které je spojitě. [39]

Tab. 8-0: Produkční reakce neutronů při interakci $p + D$ [39]

Reakce	Energie reakce (MeV)	Prah reakce (MeV)
$D(p, n)2p$	-2,22	3,34

Z obrázku 7-1 je vidět odlišnost spekter, pokud se změní úhel dopadu částice na terč. Tuto myšlenku zkoumal ruský fyzik B.V. Rybakov, který bombardoval terčík svazky protonů o energii 8,6 MeV pod úhlem 0, 20 a 40 stupňů. Ze spektra je vidět, že nejvyšší výtěžek z reakce je, pokud částice dopadá na terč pod nulovým úhlem. [39]

8.2 Reakce $p + \text{Be}$

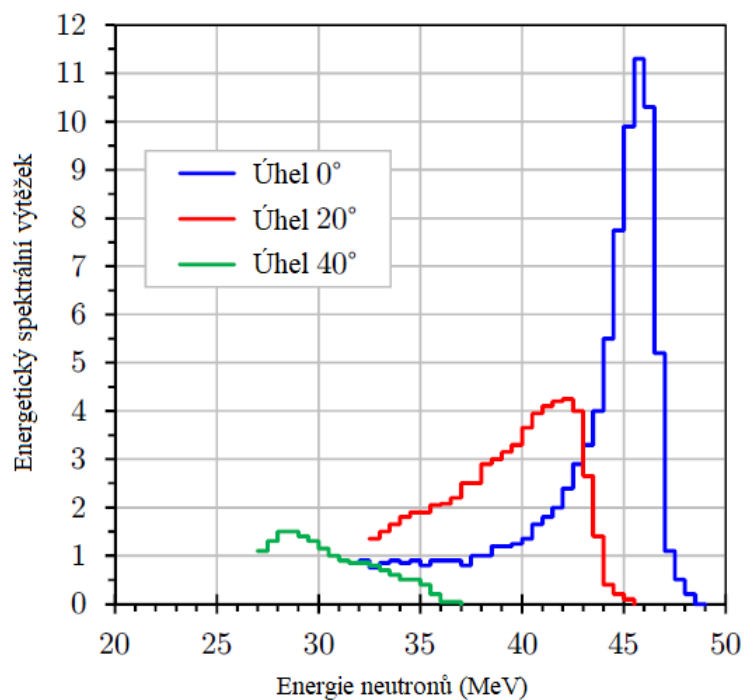
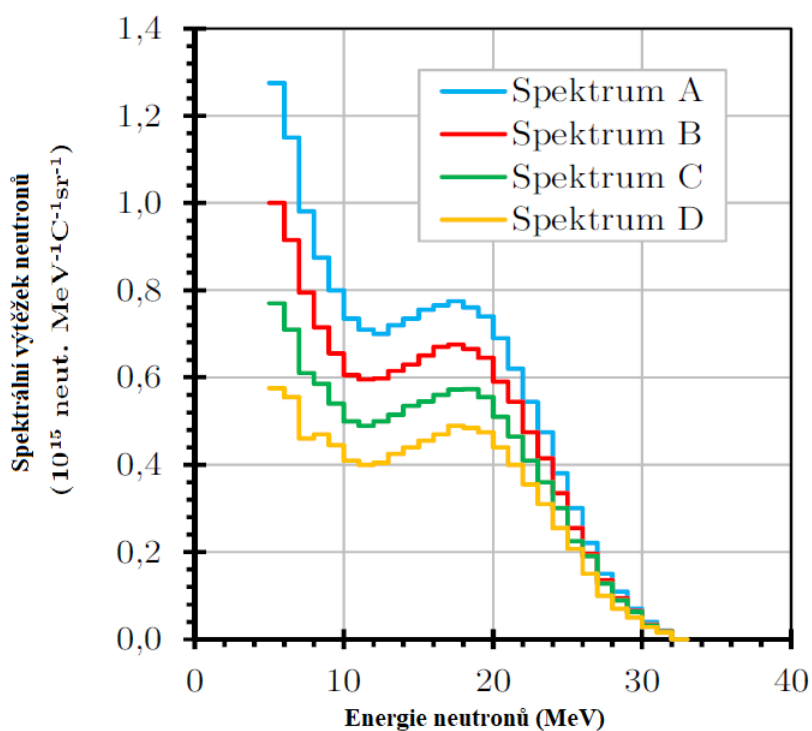
Neutronové spektrum při reakci protonu s beryliem je dáno intenzivní složkou rychlých neutronů a neutronů s nižší energií v jednotkách MeV nebo stovek keV. Rychlé neutrony vznikají z reakce ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$, neutrony s nižší energií pak z reakcí ${}^9\text{Be}(p, n\alpha){}^5\text{Li}$, ${}^9\text{Be}(p, pn){}^8\text{Be}$ a ${}^9\text{Be}(p, p\alpha){}^5\text{He}$. Helium se rozpadá na neutron a částici α .

Beryliové terče jsou nejčastěji využívány u zdrojů řízených urychlovačem. Jsou to zdroje spojitých spekter vyšších intenzit a využívají se často v rámci medicíny při radioterapiích. Díky tepelným vlastnostem beryllia a energiím z reakcí $p + \text{Be}$ a $d + \text{Be}$, jsou tyto zdroje významné pro generaci rychlých neutronů.

Na obrázku 7-2 jsou vyobrazena čtyři spektra neutronů při reakci $p + \text{Be}$. Spektrum A není nijak filtrované, zatím co ostatní spektra jsou různě silnými vrstvami polyethylenu. [39]

8.3 Reakce $p + \text{Li}$

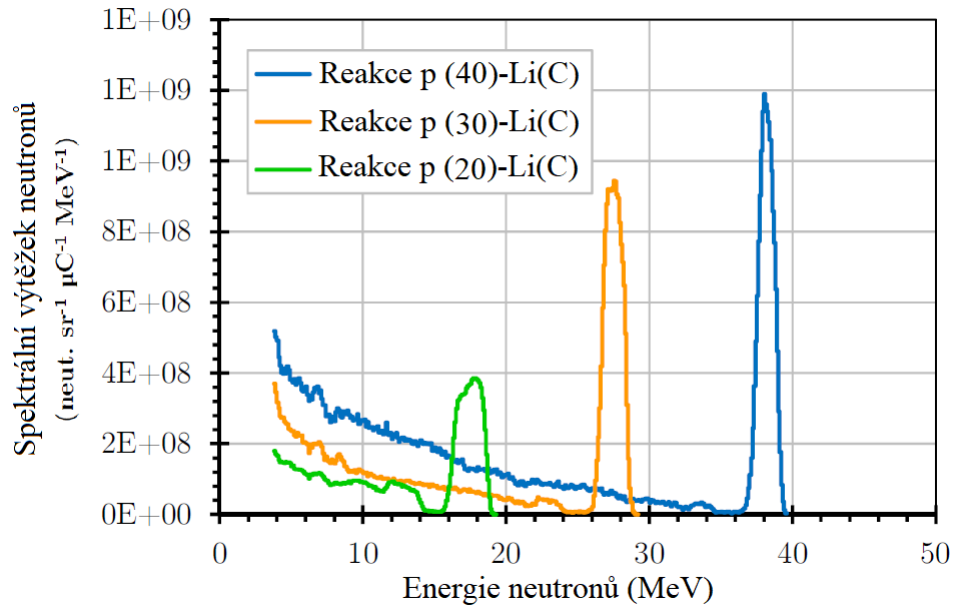
Jsou koncipované jako zdroj s tenkým terčem a produkují neutrony v impulzech v dopředném směru. Využívá se pouze malá část protonových svazků. Zbylé svazky prochází terčíkem bez jakékoliv interakce, kde se zastavují vhodným materiálem a nebo se odklání z osy průchodu

Obr. 8-1: Neutronové spektrum $p+D$ [39]Obr. 8-2: Neutronové spektrum $p+Be$ při úhlu 0 stupňů [39]

terčem, aby neutronové pole nebylo těmito protony ovlivněno. Nejčastěji se protony zastavují materiálem s nízkým účinným průřezem pro reakce (p, xn) , aby se redukoval vliv vznikajícího spojitého spektra. [39]

Tab. 8-2: Produkční reakce neutronů při $p + Li$ [39]

Reakce	Energie reakce (MeV)	Prah reakce (MeV)
${}^7\text{Li}(pn){}^7\text{Be}$	-1,64	1,88
${}^7\text{Li}(p2n){}^6\text{Be}$	-12,32	14,09
${}^7\text{Li}(ppn){}^6\text{Li}$	-7,25	8,29
${}^7\text{Li}(ppd){}^5\text{He}$	-9,46	10,82
${}^7\text{Li}(p3He){}^5\text{He}$	-3,97	4,54
${}^7\text{Li}(pn\alpha){}^3\text{He}$	-3,23	3,69

Obr. 8-3: Neutronové spektrum $p+Li$ [39]

9 Fúzní neutronové generátory

Namísto rozdělení těžkých prvků od sebe k vytvoření lehčích, fúzní generátory neutronů kombinují lehké prvky a vytvářejí prvky těžší a uvolňují tak neutrony od jader.

K jaderné fúzi dochází po reakci *deuteria* a *tritia* ($D + T$) nebo *deuteria* a *deuteria* ($D + D$), které narážejí do kovového terče. Reakcí ($D + D$) vzniká iont helia (^3He) a neutronu s energií 2,5 MeV, zatímco u reakce ($D + T$) dochází k emisi neutronu o energii 14,5 MeV společně se vznikem He-4 . Reakce deuteria s tritiem je znázorněna v rovnici 7.1. Deuterium je stabilním izotopem vodíku, který obsahuje jeden neutron, proton a elektron, a lze získat z běžné vody, zatímco tritium, který v jádře obsahuje jeden proton a dva neutrony, se vyrábí za pomoci lithia při fúzní reakci nebo jako odpadní produkt z energetického reaktoru. Když se spojí dva protony, jeden se musí změnit na neutron. [32] [23]



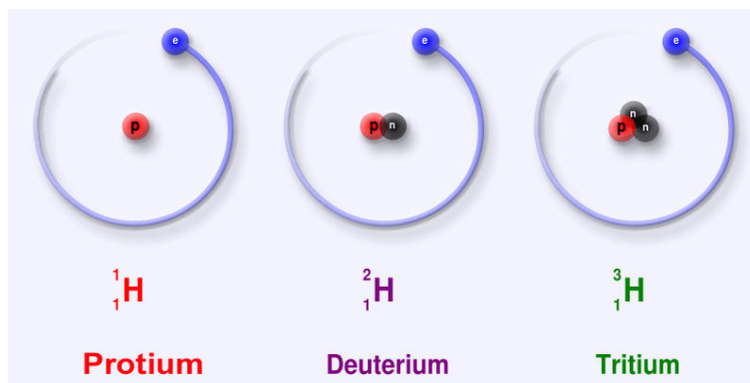
Hlavní výhodou je, že generátory neutronů bývají mnohem kompaktnější než silné zdroje, jako jsou například reaktory nebo spalační zdroje. Dosahují tak malých rozměrů, že je lze bez problému přenášet a umístit na potřebné pracoviště. Vzhledem k jejich velikosti produkují neutrony s nízkou energií, které se často pohybuje na hodnotě 14 MeV s vysokým výnosem 10^8 až 10^{10} neutronů za sekundu. I tak malé zdroje jsou velmi užitečné pro využití v průmyslových aplikacích, jako je například kontrola nákladu, detekce výbušnin atd.

Generátory neutronů používají kompaktní lineární urychlovač částic k vzájemnému spojení izotopů vodíku. Nejnovější generace průmyslově vyráběných generátorů značky Phoenix například primárně využívá paprsek deuteriových iontů k řízení produkce neutronů. Deuterium se vyskytuje v mořské vodě v podílu asi 0,02 %. Kladně nabití ionty jsou formou paprsku a vysílány na cíl o energii až 300 kV. Když iontový paprsek zasáhne cíl, atomy deuteria nebo tritia v cílové části se spojí s ionty deuteria, aby vytvořily těžší izotopy vodíku a uvolnily neutrony. Tyto neutrony jsou následně emitovány z generátoru a využity pro širokou škálu průmyslových aplikací.

Další velkou a důležitou výhodou těchto generátorů je jejich velmi nízká produkce jaderného odpadu. Tento fakt má za důsledek, že generátory DD a DT jsou mnohem bezpečnější a není k jejich provozu třeba velkých bezpečnostních dohledů a opatření, jako jsou u štěpných reaktorů. Výhodou je také možnost rychlého vypnutí a zapnutí generátoru v případě potřeby. Na rozdíl od reaktoru, ve kterém lze reakci zastavit pouze spuštěním absorbačních tyčí. Po odstavení reaktoru je pak potřebná dlouhá doba pro najetí na požadovaný výkon. [32] [23]

9.1 Neutronové zdroje v průmyslu

Vedle vědeckého využití neutronových zdrojů je druhým odvětvím využívání těchto částic průmysl. V průmyslovém odvětví je jedna z důležitých vlastností neutronového zdroje také kompaktnost a s ní úzce spojena praktičnost používání. Výzkumné reaktory, spalační zdroje jsou masivní stavby, které zabírají spousty prostoru. Ačkoliv mají vysoký neutronový tok, tak díky jejich gigantickým rozměrům nedokáží pokrýt veškerou potřebu zdrojů v průmyslu. Proto byly vyvinuty zdroje, které jsou svojí velikostí a neutronovým tokem vhodné pro využití v tomto odvětví. Po zdrojích je požadováno dostatečné množství neutronového záření pro využití v průmyslových aplikacích, jako je testování účinků záření, zobrazování neutronů, stanovení jaderného paliva, implantace iontů, výroba lékařských izotopů a dalších aplikací.



Obr. 9-1: Atom protia, deuteria a tritia [2]



Obr. 9-2: Neutronový generátor Thermo Scientific API 120 [1]

Kromě reaktorů a spalačních zdrojů jsou v průmyslu převážně využívány neutronové generátory. Aby byly schopny nahradit silné zdroje neutronů, je nutné zařídit, aby jejich produkce neutronů byla dostatečně velká. Proto jsou neustále vyvíjeny nové fúzní generátory, které produkují velké množství neutronů.

9.2 Neutronová radiografie

Neutronová radiografie, neboli NDT (non-destructive testing), je metoda výzkumu materiálů pomocí neutronového záření. Oblast NDT se skládá z široké škály technik používaných k hodnocení vlastností a struktur materiálů bez jejich poškození. NDT se často provádí pro výzkum a vývoj, zajištění kvality nebo analýzu poruch. V průmyslu nedestruktivního testování existuje mnoho aplikací, pro které je zobrazování pomocí neutronů velmi vhodné. Protože neutrony mohou pronikat materiálem o vysoké hustotě způsobem, který rentgenové paprsky nemohou.

Neutronová radiografie je široce používána pro kritické komponenty letectví s tlustými vnějšími skořepinami, jako jsou lopatky turbíny, které je obtížné kontrolovat pomocí rentgenových paprsků. Neutrony lze také použít k detekci vody a vlhkosti uvnitř složek, například archeologických vzorků zapouzdřených v materiálu, který rentgenové paprsky nemohou proniknout. [30]

Aplikace neutronového zobrazování:

- Detekce vnitřních vad v odlitých částech
- Kontrola vnitřní struktury doplnkově vyráběných součástí

- Detekce přítomnosti a polohy kapaliny uvnitř hustého kovu a komplexních sestav
- Nalezení důkazů koroze uvnitř kovových potrubí
- Identifikace vazebných vad v lepidlech a rozpuštění kompozitu z uhlíkových vláken
- Kontrola betonu a svarů z hlediska strukturální integrity
- Detekce koroze, vlhkosti a znečištění vody v elektronických součástkách a mechanických strukturách
- Detekce a identifikace pozic o-kroužků, těsnění, maziv a lepidel uvnitř komplexních sestav
- Nalezení defektů v keramice nitridu křemíku
- Zobrazování chování mazacích a chladicích olejů v chladicích komponentách
- Měření účinnosti odpuzovačů vlhkosti
- Zobrazování šíření rázových vln v plynných tělech
- Zobrazování vzorců a dynamiky tekutinových sprejů
- Měření koncentrací boru v materiálech na ochranu před zářením



Obr. 9-3: Telefon zobrazen neutronovou radiografií [30]

9.3 Výroba lékařských izotopů

Lékařské izotopy jsou v medicíně využívány zejména při diagnostikování nádorů. Ročně se uskuteční desítky milionů zákroků pomocí těchto radionuklidů, kdy nejvíce využívaným izotopem je technecium-99m (^{99m}Tc). ^{99m}Tc je navázáno na radiofarmakum, které je umístěno pacientovi do těla. Pacient je následně snímán gama kamerou, která detekuje izotop technecia-99m a tím zobrazuje aktivní část nádoru, cysty. Podmínkou pro využití radionuklidu, je jeho adekvátně dlouhý poločas rozpadu, který nesmí být příliš krátký, aby mohla být využita potřebná doba pro vyšetření. Nesmí být ani příliš dlouhý, kvůli hromadění nuklidů v těle.

Proto je využíváno technecium s poločasem rozpadu 6 hodin. Rozpad izotopu musí také vyprodukovat gama záření o takové energii, aby jej bylo možné detekovat kamerou. Postup výroby technicia-99m je komplikovaný jeho krátkou dobou rozpadu. Ve většině případů se vyrábí ve výzkumných reaktorech, kde z obohaceného uranu vznikne ^{99}Mo (Molybden-99), který má poločas rozpadu 66 hodin, díky kterému je mnohem vhodnější na transport a krátkodobé skladování. V laboratoři v blízkém okolí nemocnice je následně prováděna přeměna na $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Díky vysokému vytížení, staří, složitosti výstavby a správy výzkumných jaderných reaktorů byla vynalezena alternativa na výrobu molů ve formě neutronových generátorů, založených na fúzní reakci deuterium-deuterium s neutronovým výtěžkem vyšším než $3 \cdot 10^{11}$ n/s. [25] [30] [13]

9.4 Skenování jaderného paliva

Neutronové záření hraje klíčovou roli při zajišťování kvality jaderných palivových tyčí. Tyče jaderného paliva musí před instalací do štěpného reaktoru splňovat vysoké standardy kvality, jako je velikost, tvar a obsah obohaceného uranu. Poškozené a vadné palivové tyče musí být zakořeněny, aby bylo zajištěno, že reaktor funguje hladce, a pro zjištění těchto poškození a defektů lze použít neutronové záření. Většina systémů pro skenování jaderného paliva používá kalifornium-252 jako zdroj neutronů

V tomto způsobu palivové tyče procházejí skenerem s aktivací zónou, ve které jsou vystaveny neutronovému záření a štěpná aktivita je následně měřena, když tyče opouštějí zářič. Z této a dalších informací se stanoví obohacení a další vlastnosti každé tyčinky a pelety. Kalifornium-252 se tradičně používá jako zdroj neutronů v aktivní zóně, protože se jedná o intenzivní emitore neutronů a je snadno zabalen do kompaktních přenosných kapslí. Někteří uživatelé, včetně výrobců jaderného paliva, hledají kvůli nákladům a dodávkám kalifornia-252 alternativní zdroje neutronů. Proto byl vyvinut neutronový zdroj na bázi urychlovače s vysokým tokem, který je životaschopnou alternativou pro aplikace vyžadující velké zdroje ^{252}Cf - v miligramovém měřítku nebo větší - jako je skenování jaderných palivových tyčí a kalibrace detektoru toku neutronů. [30]

9.5 Detekce výbušnin

Neutronové záření lze použít jako nástroj pro detekci a identifikaci složení výbušnin a lze jej také použít ke skenování speciálního jaderného materiálu (SNM). Metoda rozpoznávání výbušnin je založena na rychlé pulzní neutronové analýze (Pulse Fast Neutron Analysis, PFNA). Prostor nebo objekt je po určitou dobu vystaven proudu rychlých neutronů v nanosekundových pulzech, kde neutrony po srážce se zkoumaným objektem emitují elektromagnetické gama záření. Z vlnové délky gama záření, které dopadá na detektor, lze rozpoznat chemické složení materiálu, zejména lehké organické prvky, například uhlík, dusík nebo kyslík, které jsou základním prvkem většiny výbušnin a dalších nebezpečných látek. Tyto generátory jsou využívány v armádě nebo v odbavovacích halách letišť, kde se využívají k rozpoznání obsahu zavazadel. Díky době letu neutronu a gama záření lze vypočítat tvar, velikost a chemickou strukturu podezřelého objektu uvnitř zavazadla. [30] [35]

Existuje několik druhů provedení neutronových skenerů. Na obrázku 9-4 je kompaktní ruční generátor neutronů. Detekce se provádí vzorkováním vzduchu uvnitř nebo na povrchu zkoumaného objektu a analyzuje charakteristické složky výbušnin. Detektor je schopen rozpoznat stopy výbušnin na bázi nitroglycerinu, trinitrotoluenu a dalších.

Tab. 9-3: Parametry přenosného neutronového detektoru

Mobilní neutronový skener výbušnin	
Energie neutronů	14 MeV
Neutronový tok	$100 \cdot 10^6$ n/s
Počet detektorů gama záření	12
Životnost zářiče	1000 h



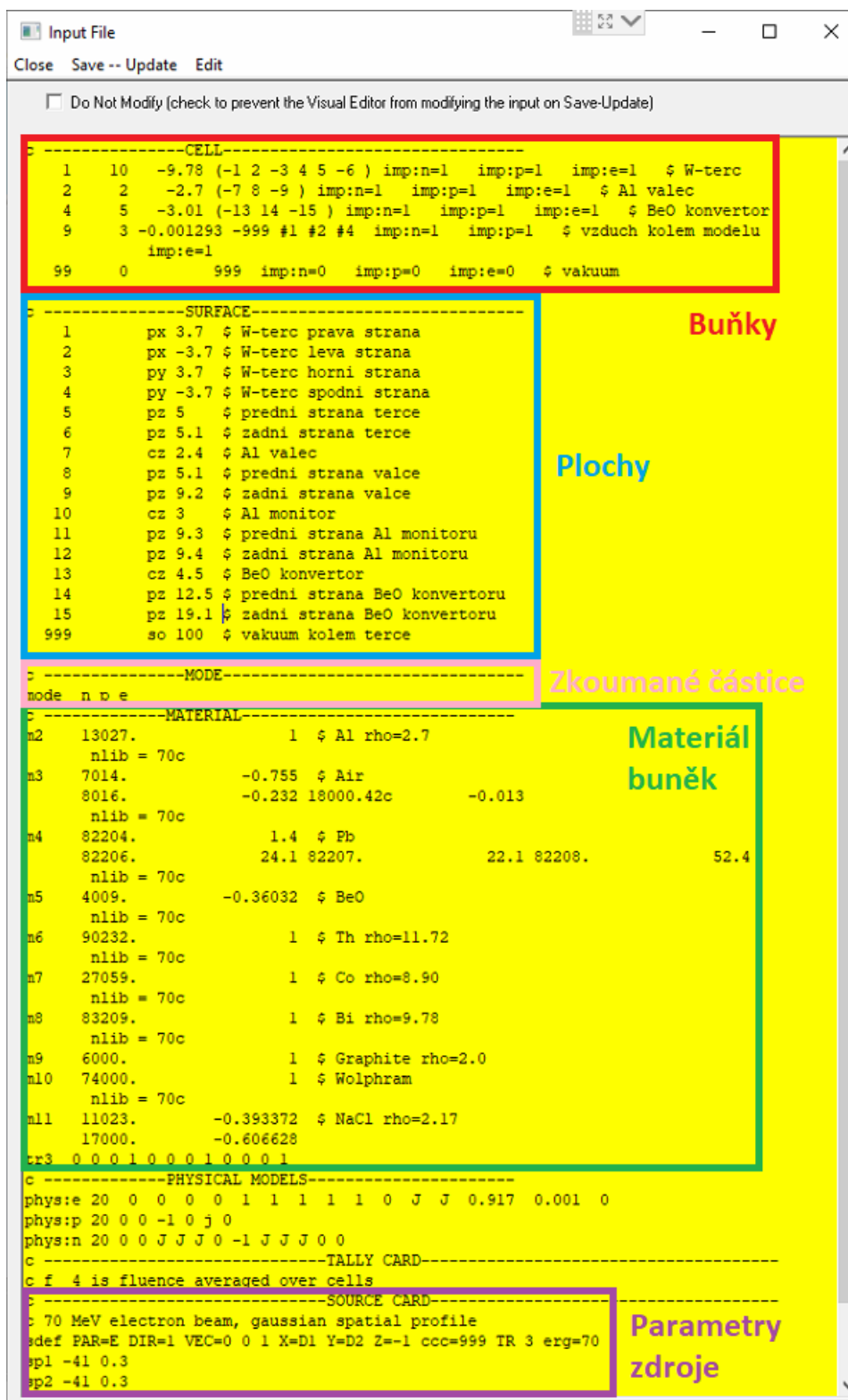
Obr. 9-4: Ruční neutronový skener Pilot-M1 Premium [35]

10 Monte Carlo N-Particle

Monte Carlo N-Particle, zkráceně MCNP, je univerzální kód, vyvinutý v Los Alamos National Laboratory. Je to mezinárodně uznávaný kód pro analýzu transportu téměř všech částic, který využívá výpočetní metodu Monte Carlo. Tento kód se zabývá tokem neutronů, gama paprsků a sdruženým transportem, tj. Transportem sekundárních gama paprsků vyplývajících z interakcí neutronů. MCNP kód umí také zpracovat transport elektronů, jak primárního zdroje, tak sekundárních elektronů vytvořených interakcemi gama-paprsků

V MCNP je daný model vytvářen pomocí základních ploch – nejčastěji rovina, válcová a kulová plocha. Parametry těchto geometrických útvarů jsou zadávány do textového souboru v programu, který je na obrázku 10-1. Celý systém pracuje s kartézskou soustavou souřadnic, takže jednotlivé parametry jsou zadávány jako body uvnitř soustavy. Zadané plochy určují hranice buněk, které mají určitý objem a tvar. Buňkám je přidán materiál, ze kterých jsou zhotoveny a celá soustava je uzavřena do koule. Ta je vyplněná materiálem okolí – nejčastěji vzduchem – z důvodu, aby částice které opustí vyhrazený prostor a dostanou se tak do „mrtvé zóny“ zbytečně nezatěžovaly výpočet. Jak již bylo řečeno, jednou z možností zadávání příkazů do MCNP je textový soubor. Soubor je rozdělen na karty, do kterých se zadávají známé parametry materiálů a vstupní konstanty.

Důležitou součástí MCNP jsou takzvané „Tally“ buňky. Tallies jsou procedury předdefinované v programu a výstupem z nich jsou veličiny, které charakterizují radiační pole v místě buňky. Veličiny jsou definované počtem a typem částic procházející tally buňkou. MCNP je schopno simulovat přes 30 druhů částic, pro potřeby této práce jsou však využity pouze protony (p), neutrony (n) a elektrony (e). Přehled tally a jejich vlastností je v tabulce 10-1.



Obr. 10-1: Vstupní textový soubor MCNP

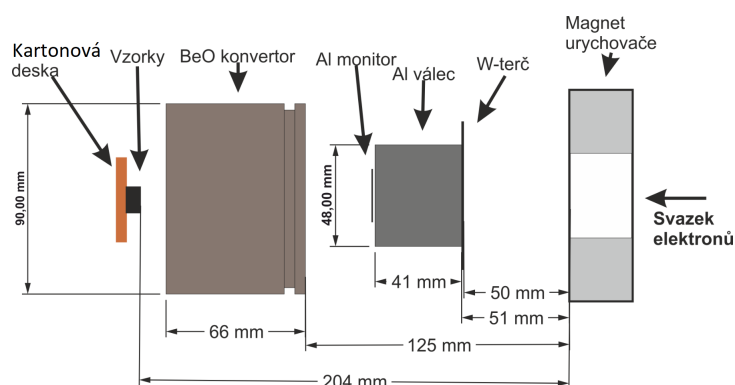
10.1 Návrh zdroje

Jako model neutronového zdroje na bázi (gamma, n) byl v programu MCNP 6.2 namodelován soubor buněk z vhodných materiálů, které jsou umísťovány elektronům do cesty tak, aby při interakci s daným materiálem vzniklo záření gama, ze kterého po interakci s konvertorem vznikne

Tab. 10-1: Přehled Tally a jejich vlastností

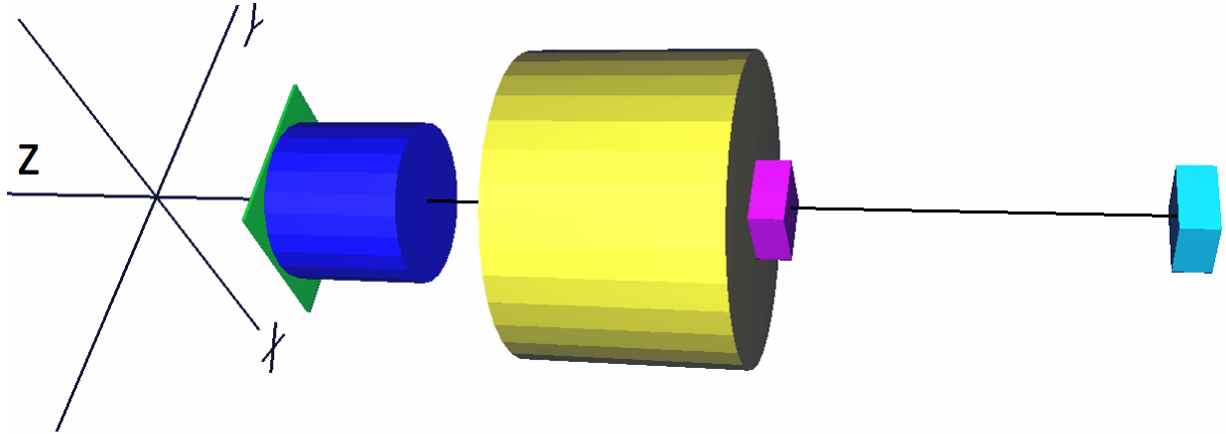
Označení tally	Podporované částice	Základní charakteristika	Fyzikální rozměr
f1	n p e	počet částic prošlých plochou	počet
*f1	n p e	energie prošlá plochou	MeV
f2	n p e	fluence průměrovaná přes plochu	počet/cm2
*f2	n p e	fluence energie prům. přes plochu	MeV/cm2
f4	n p e	fluence prům. přes buňku	počet/cm2
*f4	n p e	fluence energie prům. přes buňku	MeV/cm2
f5	n p	fluence v bodovém/prstencovém detektoru	počet/cm2
*f5	n p	fluence energie v bodovém/prstencovém detektoru	MeV/cm2
f6	n p	energie deponovaná v jednotce hmotnosti	MeV/g
*f6	n p	energie deponovaná v jednotce hmotnosti	jerks/g
f7	n	neutronové štěpení jader	MeV/g
*f7	n	neutronové štěpení jader	jerks/g
f8	p e	počet částic absorbovaných v buňce	pulsy
*f8	p e	energie deponovaná v buňce	MeV
f8+	e	náboj vzniklý v buňce	náboj

neutron. Zdroj neutronů navržený pro tuto práci obsahuje milimetrovou fólii z wolframu, kde dopadající elektron o energii 70 MeV interaguje s hustou sítí atomů wolframového terče. Zde probíhá brzdné záření, při kterém se uvolňuje záření gama. Fólie je spojena s hliníkovým válcem, kde záření interaguje s jádry atomů hliníků a vzniká zde malé množství neutronů. Jelikož je hliník měkký prvek s nízkou hustotou, nepřemění se zde veškerá gama na neutrony. Z tohoto důvodu je i neutronový tok z hliníkového válce velmi malý. Aby byl výtěžek neutronů ze zdroje vysoký, je nutné využít konvertor s materiálem o vysoké hustotě a pevnosti. V této práci byl využit oxid beryllia a lithná sůl, kde je výtěžek neutronů dostatečný. Schéma modelu je na obrázku 10-2 a na obrázku 10-3 je celý model zobrazen ve 3D.



Obr. 10-2: Schéma navrženého modelu s rozměry

V modelu jsou využity tally buňky f4, které počítají průměrný tok všech tří částic buňkou. Na 3D modelu 10-3 je vidět, že model obsahuje pět buňek tally. Hliníkový válec (modrý) a čtyři buňky obsahující pouze vzduch (tyrkysová, fialová), jsou umístěny přímo na ose Z a počítají, jaký počet částic se pohybuje v přímém směru. Další dvě vzduchové tally jsou 7 mm vychýlené od Z osy, aby bylo možné zjistit spektrum částic, odchylující se z přímého směru do prostoru.



Obr. 10-3: Navržený model zobrazen ve 3D

11 Aktivační měření

Ozařováním terče určitého materiálu částicemi nebo gama zářením, dochází k reakcím s jádry terčového materiálu. Zde v závislosti na průřezu reakce dochází k radioaktivním přeměnám, které jsou doprovázeny zářením gama. Měřením tohoto záření lze získávat informace o reakci v terči.

Výhoda metody aktivačního měření je její vysoká citlivost, díky které je možné určit reakční rychlost, účinný průřez reakce, typ a množství vzniklých produktů. Velikou výhodou je, že toto měření je využitelné i pro materiály, které obsahují několik izotopů. Nutnost přemísťovat ozařovaný radioaktivní materiál mezi místem aktivace a spektroskopem, je jednou z nevýhod metody měření. Dalšími nevýhodami je neschopnost stanovit výsledky měření, díky velmi krátkému poločasu přeměny, emitování doprovodného záření s nízkou intenzitou a nízký účinný průřez reakcí.

Praktickou částí této práce je porovnání různých druhů fólií, které jsou ozařovány neutrony z navrženého (gamma, n) zdroje. Pomocí zpožděného gama záření emitovaného během přeměny, se následně vypočítá reakční rychlost podle rovnice (11.1). Jako terčové materiály jsou využity fólie z pevných materiálů kterými jsou zlato, bismuth a cobalt. V jádrech těchto materiálů probíhají základní jaderné reakce: štěpení, radiační záchyt, nepružný rozptyl.

$$R_R = \frac{M}{N_A m} \frac{S(E_\gamma) \lambda_{t_{live}}^{t_{real}}}{\epsilon_{FEP}(E_\gamma) I_\gamma(E_\gamma) I_P} \frac{1}{1 - e^{-\lambda t_{irr}}} \frac{1}{e^{-\lambda t_{delay}}} \frac{1}{1 - e^{-\lambda t_{real}}} \quad (11.1)$$

$$[R_R] = (atom^{-1}, elektron^{-1}) \quad (11.2)$$

kde m je hmotnost aktivačního vzorku, M je molární hmotnost prvku. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11-1. N_A je Avogadrova konstanta, t_{live} je efektivní čas měření. Je to celková doba měření t_{real} od které je odečtena mrtvoá doba, tedy čas, kdy je zahlcen detekční systém. ϵ_{FEP} je účinnost detekce píku plného pohlcení, $I_\gamma(E_\gamma)$ je intenzita linky gama záření a $S(E_\gamma)$ je plocha naměřeného píku o určité energii. Hodnota t_{live} je čas na konci ozařování a t_{delay} je doba prodlení mezi koncem ozařování a začátkem měření.

Avogadrova konstanta má hodnotu: $N_A = 6,02214076 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

λ je rozpadová konstanta a vypočítá se podle vzorce (12.3)

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (11.3)$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (11.4)$$

Veličina I_p je integrální počet elektronů, kterým byl materiál vystaven po dobu ozařování. Je to proud elektronů ze zdroje, které narazí do terče za jednu sekundu.

Pro přesnost výpočtu jsou ve vzorci pro reakční rychlost zavedené korekční členy. Tyto členy jsou zavedeny proto, aby ve výpočtu nevznikla chyba, kterou nelze zanedbat.

- $\frac{1}{\epsilon_{FEP}(E_\gamma)}$ korekce na účinnost detektoru,
- $\frac{1}{I_\gamma(E_\gamma)}$ korekce na intenzitu dáma linky,
- $\frac{1}{1-e^{-\lambda t_{irr}}}$ korekce na rozpad při ozařování,
- $\frac{1}{e^{-\lambda t_{delay}}}$ korekce na rozpad při transportu,
- $\frac{1}{1-e^{-\lambda t_{real}}}$ korekce na rozpad při měření.

11.1 Data měření

Pro vypracování praktické části byly využity data z testovacího měření Yerevan. V tomto experimentu byly ozařovány fólie z různých izotopů a pro generování neutronů byly použity konvertory BeO a lithná sůl LiCl. Na fóliích probíhalo měření doprovodného záření, ze kterého byla následně vypočítána reakční rychlost v materiálu. Pro tuto práci jsou zpracovány data pro fólie z izotopů 197-Au, 209-Bi a 59-Co. U měření s konvertorem BeO byla doba ozařování fólií dlouhá 3 hodiny a 51 minut (13860 sekund) se 47 minutovou technickou přestávkou. Čistá doba ozařování tedy byla 11040 sekund po kterých byl ze zdroje produkován proud elektronů o energii 70 MeV s intenzitou $0,32 \mu\text{A/s}$. Během této doby byly ozářeny i fólie, které jsou využity v této práci. Po jejich ozáření byly fólie podstoupeny měření, které proběhlo s časovou prodlevou od ukončení jejich ozařování. U konvertoru z LiCl byla doba ozařování t_{irr} také 3 hodiny a 4 minuty (11040 sekund) se stejnou energií neutronů. Hodnota proudů neutronů od zdroje byla $0,33 \mu\text{A/s}$. Hodnoty času zpoždění se u každého izotopu liší a jejich hodnoty jsou zaznamenány pro oba konvertory v tabulce.

Jelikož jsou hodnoty intenzit v jednotkách $\mu\text{A/s}$ bylo pro výpočet reakční rychlosti přepočítat tento proud na počet elektronu dopadající na terč za jednu vteřinu.

Tab. 11-0: Tabulka údajů ozařování

Konvertor	Materiál	Konec ozařování	Začátek měření	M (g/mol)	m (g)	I_p (e/s)
BeO	Bi	17:15	19:19	208,9804	0,58721	1,9975E+12
BeO	Au	17:15	10:22	196,966569	0,03688	1,9975E+12
BeO	Co	17:15	15:03	62,42	0,2159	1,9975E+12
LiCl	Bi	16:59	9:17	208,9804	0,72764	2,05993E+12
LiCl	Au	16:59	21:29	196,966569	0,0401	2,05993E+12
LiCl	Co	16:59	14:08	62,42	0,2236	2,05993E+12

Jelikož je proud definován jako náboj elektronu za jednotku času, bylo nutné tuto hodnoty vydělit hodnotou náboje elektronu, který je $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Pro model s konvertorem BeO byla získána hodnota intezity I_p podle rovnice 11.5 a pro konvertor LiCl z rovnice 11.6.

$$I_p = \frac{I_{p\mu A}}{1,602 \cdot 10^{-19}} = \frac{0,32 \cdot 10^{-6}}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 1,9975 \cdot 10^{12} \text{ elektron/s} \quad (11.5)$$

$$I_p = \frac{I_{p\mu A}}{1,602 \cdot 10^{-19}} = \frac{0,33 \cdot 10^{-6}}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 2,06 \cdot 10^{12} \text{ elektron/s} \quad (11.6)$$

Pro výpočet ϵ platí vztach 11.7.

$$\epsilon = e^{\sum_{i=0}^n a_i \cdot \ln(E_\gamma)^i} \quad (11.7)$$

, kde a_i je parametr fitovací funkce, kterou jsou proloženy body účinnosti detektoru. Hodnoty těchto parametrů pro měření v Yerevanu, jsou v tabulce 11.2.

Tab. 11-0: Parametry fitovací funkce

a0	-4,46E+00
a1	-6,06E-01
a2	1,66E+00
a3	6,37E-01
a4	0,00E+00
a5	0,00E+00
a6	0,00E+00
a7	0,00E+00
a8	0,00E+00
a9	0,00E+00

11.2 Zpracování dat

Závěrem práce je výpočet reakčních rychlostí pro jednotlivé fólie pomocí rovnice 11-1. Díky reakčním rychlostem je možné charakterizovat chování jednotlivých vzorků. Výstupem je porovnání těchto rychlostí pro jednotlivé materiály, ze kterých jsou tyto fólie zhotoveny. Pro porovnání závislosti materiálu konvertoru, jsou data zpracována pro konvertory z oxidu berylia (BeO) a lithné soli (LiCl). Naměřené hodnoty jsou v tabulce 12-3 pro měření na modelu s BeO. V tabulce 12-4 jsou zhotoveny hodnoty pro model s konvertorem LiCl.

Porovnáním naměřených a vypočtených hodnot z tabulek pro oba konvertory, je vidět, že u konvertoru z LiCl, je detekováno více energetických hladin u Au a Bi. U zlata ozařovaného na modelu s LiCl konvertorem byl změřen větší počet energetických hladin s hodnotou 23,2 MeV a dvě hodnoty s energií 30,2 MeV. Tyto energetické hladiny neutronů byly však zachyceny s nízkou intenzitou gama záření, která se pohybovala v jednotkách procent. U Bi bylo naměřeno většího počtu u energetické hladiny 55,5 MeV. Rozdíl počtu naměřených energií se však oproti modelu s BeO konvertorem liší v hodnotách s nízkou intenzitou I_γ , která se opět pohybuje v jednotkách procent. U kobaltu byly naměřeny stejné energetické hladiny se stejnou energií E_γ , jako u druhého modelu.

Z vypočtených hodnot pro účinnost detektoru, které jsou vypsány v tabulkách 11-3 a 11-4, byl společně s hodnotami energií gama záření vynesena graf pro účinnost detektoru. Tento graf je na obrázku 11-1.

V grafech 11-2 a 11-3 jsou vyneseny hodnoty reakčních rychlostí v závislosti na energii gama záření. Hodnoty v těchto grafech porovnávají reakční rychlosti jednotlivých fólií na jednom modelu. Je zde vidět, že nejvyšších rychlostí je dosaženo u fólie ze zlata, naopak nejnižší rychlosti jsou naměřeny u kobaltu. Stejných výsledků jsme se dočkali u modelu, kde byl využit LiCl konvertor, jen zde jsou hodnoty posunuty o dva řády výš.

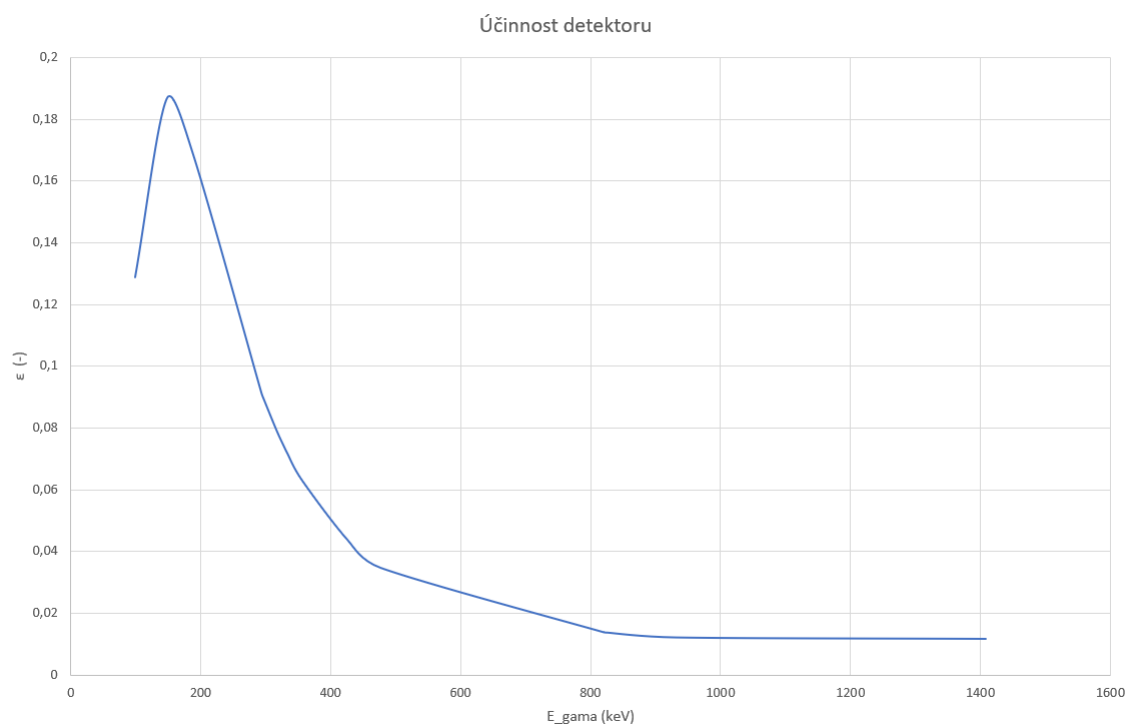
U grafů na obrázcích 11-4, 11-5 a 11-6 jsou poměřovány reakční rychlosti jednotlivé fólie a rozdíl reakčních rychlostí, které bylo dosaženo v závislosti na konvertoru modelu. Jak již bylo řečeno, hodnoty rychlostí pro LiCl konvertor jsou vyšší než-li u konvertoru BeO. To se potvrdilo i zde.

Tab. 11-0: Naměřené hodnoty zdroje s BeO konvertorem

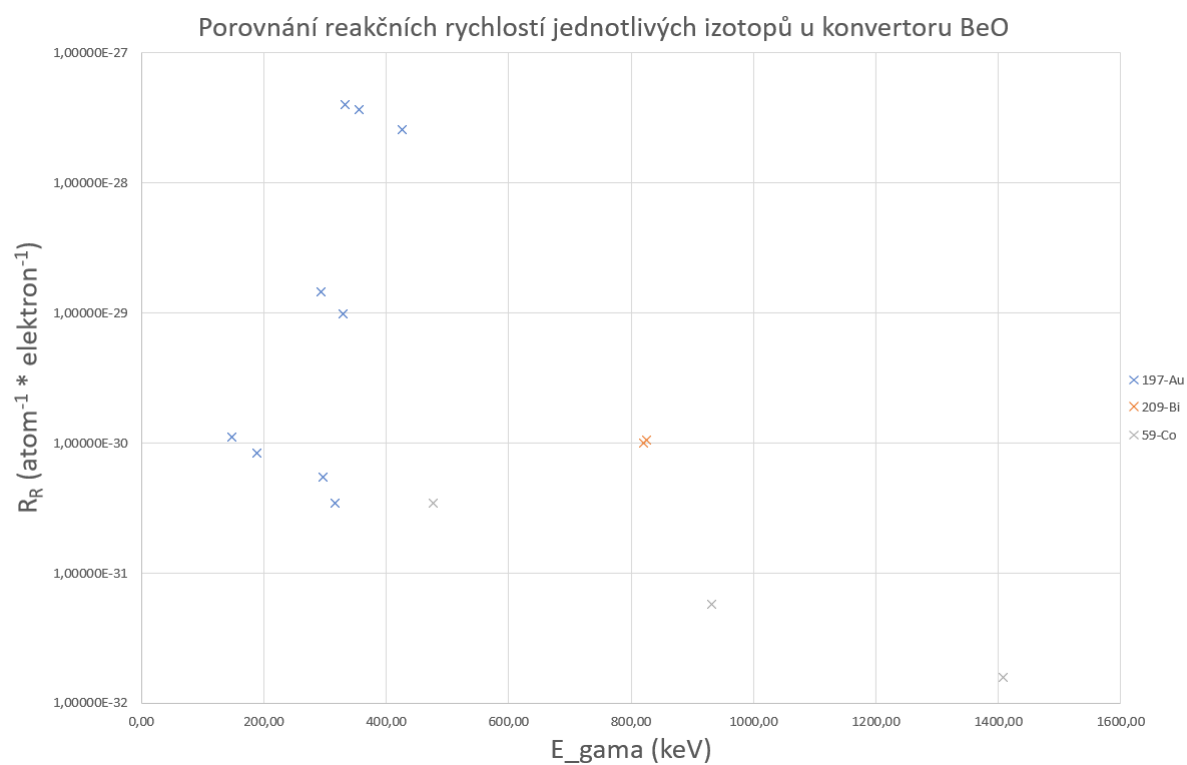
Izotop	Podíl v materiálu (%)	E (MeV)	T1/2 (s)	Energie gamma (keV)	I (%)	S	λ (s)	t_real (s)	t_live (s)	t_tirr (s)	t_delay (s)	RR	ϵ
197-Au	100	8,11	534211,2	355,73	87	253500,2	770703,849	2409	2310	11040	61620	3,66129E-28	0,06308691
197-Au	100	8,11	534211,2	333,03	22,9	68744,9	770703,849	2409	2310	11040	61620	4,03507E-28	0,071875237
197-Au	100	8,11	534211,2	426,1	6,6	16053,2	770703,849	2409	2310	11040	61620	2,56855E-28	0,043678842
197-Au	100	8,7	34920	147,81	43	1231,9	50378,91083	2409	2310	11040	61620	1,10779E-30	0,186798474
197-Au	100	8,7	34920	188,27	37,4	1497	50378,91083	2409	2310	11040	61620	8,2987E-31	0,168590746
197-Au	100	14,79	16078176	98,85	10,9	522,3	23195904,78	2409	2310	11040	61620	4,13598E-27	0,128820383
197-Au	100	23,2	136872	328,455	61	17300,6	197464,5556	2409	2310	11040	61620	9,91092E-30	0,073835825
197-Au	100	23,2	136872	293,545	10,4	3790,6	197464,5556	2409	2310	11040	61620	1,44465E-29	0,091193713
197-Au	100	38,9	17784	316,50791	58	4253,7	25656,88861	2409	2310	11040	61620	3,46574E-31	0,079283186
197-Au	100	38,9	17784	295,95827	22,3	2405,8	25656,88861	2409	2310	11040	61620	5,50235E-31	0,089847645
209-Bi	100	55,5	42336	820,3	30	7996	61077,93725	5404	5100	11040	57840	1,00422E-30	0,013816512
209-Bi	100	55,5	42336	825,2	14,6	4109,6	61077,93725	5404	5100	11040	57840	1,04911E-30	0,013719587
59-Co	100	41,2	63108	931,3	75	1019,1	91045,59864	2406	2345	11040	78680	5,74506E-32	0,012144156
59-Co	100	41,2	63108	477,2	20,2	631,6	91045,59864	2406	2345	11040	78680	3,44216E-31	0,034668411
59-Co	100	41,2	63108	1408,4	16,88	207,6	91045,59864	2406	2345	11040	78680	1,5625E-32	0,01168511

Tab. 11-0: Naměřené hodnoty zdroje s $LiCl$ konvertorem

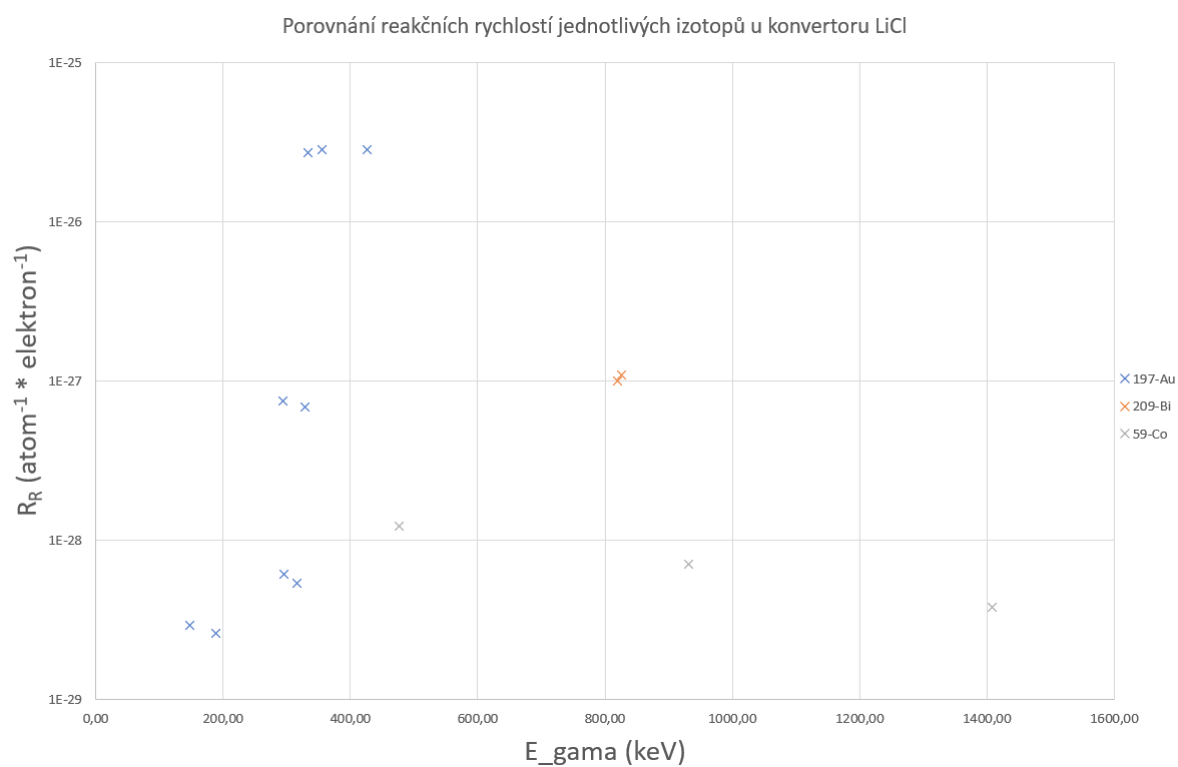
Izotop	Podíl v materiálu (%)	E (MeV)	T1/2 (s)	Energie gamma (keV)	I (%)	S	λ (s)	t_real (s)	t_live (s)	t_tirr (s)	t_delay (s)	RR	ϵ
197-Au	100	8,11	534211,2	355,73	87	171767,2	770703,849	2704	2566	11040	16200	2,82908E-26	0,063080691
197-Au	100	8,11	534211,2	333,03	22,9	46313,5	770703,849	2704	2566	11040	16200	2,71702E-26	0,071875237
197-Au	100	8,11	534211,2	426,1	6,6	10894,5	770703,849	2704	2566	11040	16200	2,8521E-26	0,043678842
197-Au	100	8,7	34920	147,81	43	1650,3	50378,91083	2704	2566	11040	16200	2,92188E-29	0,186798474
197-Au	100	8,7	34920	188,27	37,4	1467	50378,91083	2704	2566	11040	16200	2,5977E-29	0,168590746
197-Au	100	23,2	136872	328,455	61	12268,3	197464,5556	2704	2566	11040	16200	6,83277E-28	0,073835825
197-Au	100	23,2	136872	293,545	10,4	2545,4	197464,5556	2704	2566	11040	16200	7,533E-28	0,0911193713
197-Au	100	23,2	136872	1408,91	6,4	297,1	197464,5556	2704	2566	11040	16200	2,14967E-28	0,012112697
197-Au	100	23,2	136872	2043,67	3,6	120,8	197464,5556	2704	2566	11040	16200	6,134E-29	0,022054394
197-Au	100	30,2	63540	186,17	9,4	2409,9	91668,8429	2704	2566	11040	16200	3,09587E-28	0,170136123
197-Au	100	30,2	63540	255,57	6,2	947,3	91668,8429	2704	2566	11040	16200	1,98012E-28	0,11548126
197-Au	100	38,9	17784	316,50791	58	7261	25656,88861	2704	2566	11040	16200	5,34075E-29	0,079283186
197-Au	100	38,9	17784	295,95827	22,3	3392,4	25656,88861	2704	2566	11040	16200	6,12442E-29	0,089847645
209-Bi	100	55,5	42336	820,3	30	12862,6	61077,93725	5391	4921	11040	58680	1,00226E-27	0,013816512
209-Bi	100	55,5	42336	825,2	14,6	6766,3	61077,93725	5391	4921	11040	58680	1,08454E-27	0,013719587
209-Bi	100	55,5	42336	1847,4	11,4	2364	61077,93725	5391	4921	11040	58680	1,72614E-28	0,017228717
209-Bi	100	55,5	42336	1033,8	9	3001,1	61077,93725	5391	4921	11040	58680	7,54438E-28	0,011327233
209-Bi	100	55,5	42336	1679,5	8,8	1785,8	61077,93725	5391	4921	11040	58680	2,22445E-28	0,014391063
209-Bi	100	55,5	42336	847,3	8	3831,9	61077,93725	5391	4921	11040	58680	1,12505E-27	0,013312497
209-Bi	100	55,5	42336	1893	8,2	1348,9	61077,93725	5391	4921	11040	58680	1,26582E-28	0,018188158
209-Bi	100	55,5	42336	1536,4	7,5	2041,3	61077,93725	5391	4921	11040	58680	3,69411E-28	0,012705086
209-Bi	100	55,5	42336	264,2	5,2	6962,1	61077,93725	5391	4921	11040	58680	1,22674E-27	0,109445056
59-Co	100	41,2	63108	931,3	75	1650,2	91045,59864	72833	72400	11040	76140	7,05526E-29	0,012144156
59-Co	100	41,2	63108	477,2	20,2	1137,2	91045,59864	72833	72400	11040	76140	1,23409E-28	0,034668411
59-Co	100	41,2	63108	1408,4	16,88	290,2	91045,59864	72833	72400	11040	76140	3,78844E-29	0,01168511



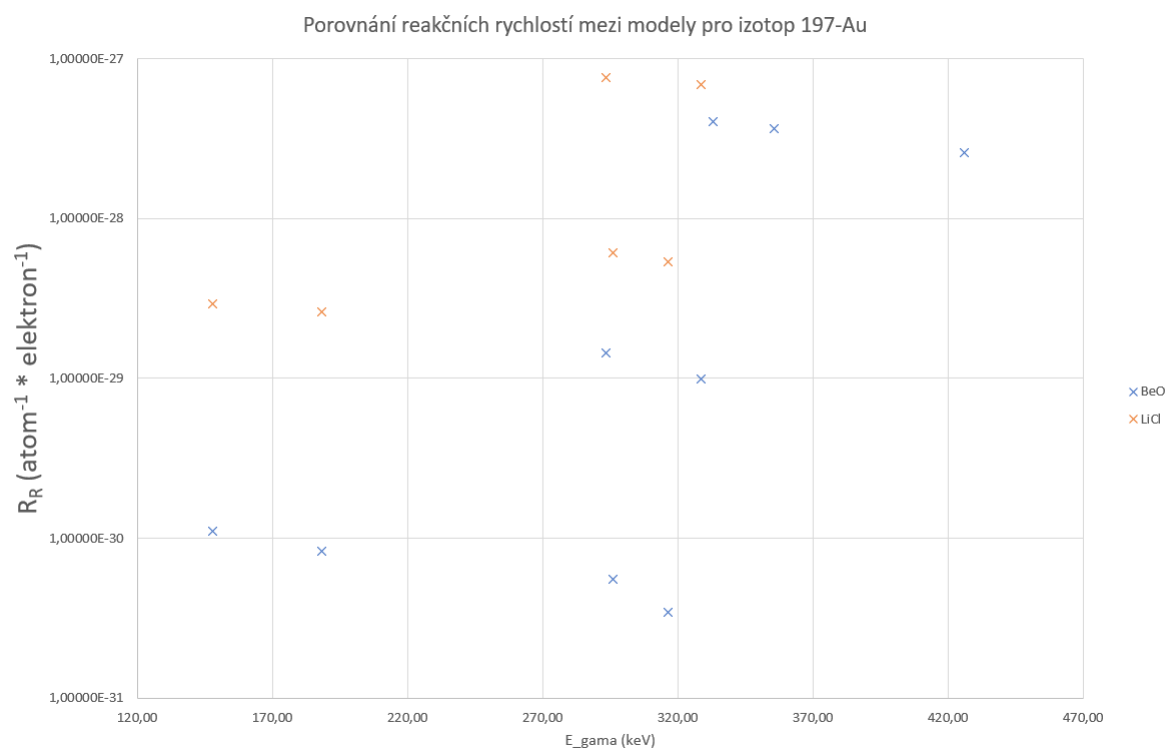
Obr. 11-1: Účinnost detektoru v Yerevanu



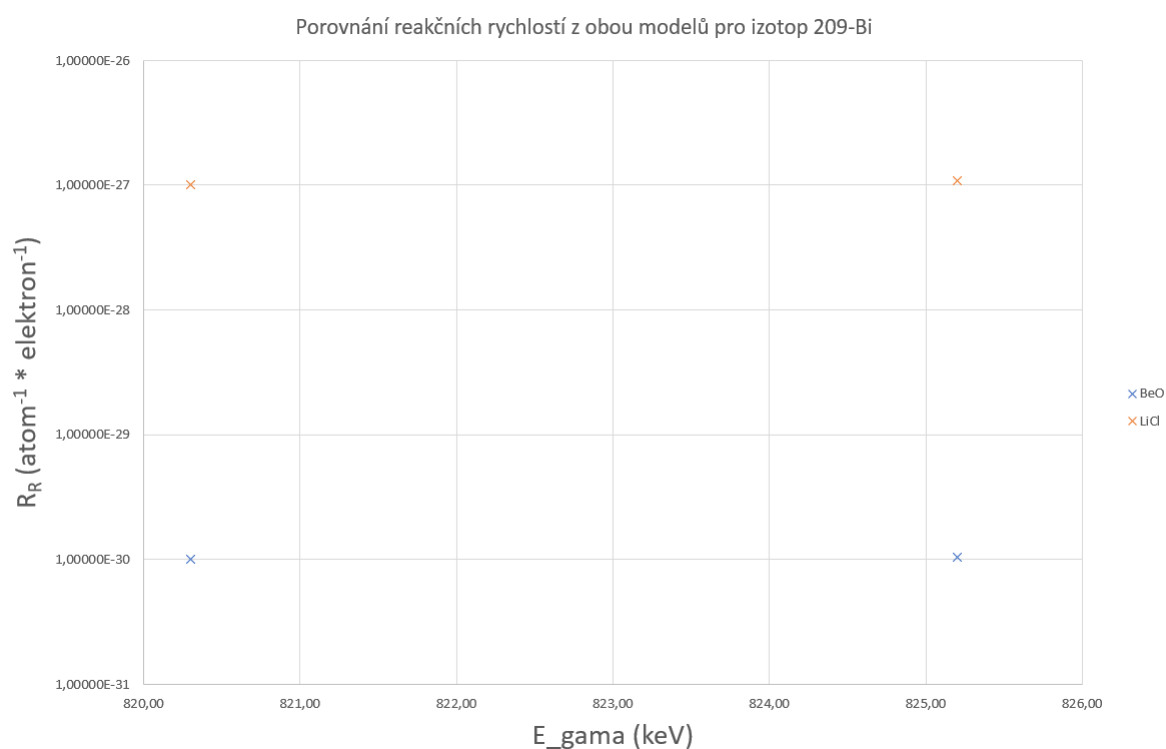
Obr. 11-2: Porovnání reakčních rychlostí jednotlivých izotopů u konvertoru BeO



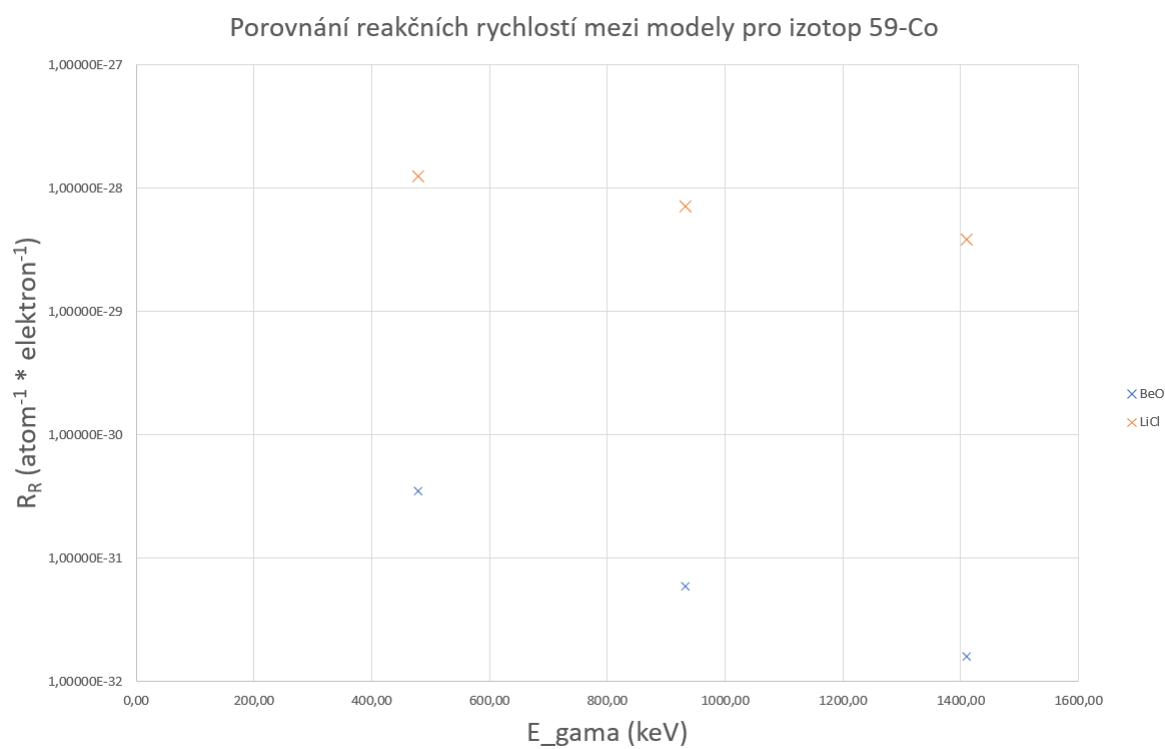
Obr. 11-3: Porovnání reakčních rychlostí jednotlivých izotopů u konvertoru LiCl



Obr. 11-4: Porovnání reakčních rychlostí mezi modely pro izotop 197-Au



Obr. 11-5: Porovnání reakčních rychlostí z obou modelů pro izotop 209-Bi



Obr. 11-6: Porovnání reakčních rychlostí mezi modely pro izotop 59-Co

12 Závěr

Neutrony a jejich vlastnosti se začínají využívat čím dál častěji a postupem času jsou využívány ve více odvětvích. Díky neutronovým zdrojům, které existují již desítky let, a hlavně těm které se nově vyvíjejí, jsou tyto částice čím dál více dostupnější. to umožňuje dalšímu výzkumu jejich využití. V této práci jsem vypsál zdroje neutronů, které jsou nejvíce využívány. Tento výčet neutronových zdrojů zahrnuje jak ty gigantické zdroje – jako jsou jaderné reaktory a spallační zdroje – až po kompaktní neutronové generátory. U každého typu zdroje, jsem popsal postup, jakým se neutron v daném zařízení vytváří a k čemu se následně využívá. Vyjmenoval jsem konkrétní zdroje a místa, kde se ve světě nachází. U produkčně vyráběných kompaktních zdrojů, jsem taktéž popsal princip generování neutronů a účel jejich vytváření. Další částí práce je výčet typů urychlovačů neutronů, které jsou využity jako zdroj elektronových svazků, které bombardují terč zdroje. V práci je také výpis některých reakcí částic, které jsou u zdrojů neutronů využívány.

V praktické části jsem se věnoval návrhu (γ, n) neutronového zdroje v programu MCNP. Po dlouhém učení s programem, jsem navrhl zdroj, ve kterém urychlené elektrony s energií 70 MeV, naráží na terč z wolframu, kde se díky brzděnému záření generuje záření γ . Gama záření následně interaguje s jádrem atomů konvertoru, kterým je v modelu váleček z oxidu beryllia. Po této reakci se emitují neutrony. První testy však ukázaly, že zisk neutronů z reakce je velmi malý. To znamenalo, že v navrženém zdroji je chyba, kterou jsem nedokázal se svými dosavadními znalostmi odstranit. Vedoucí práce mi proto poskytl data z experimentu v Yerevanu, kde se testovala reakce na různých typech terčových fólií. Pro testování byl využit model, který se podobal mému návrhu v MCNP. Také využíval konvertor z BeO, ale měření probíhalo i s konvertorem z lithné soli LiCl. Z tohoto experimentu jsem společně s vedoucím vybral tři izotopy prvků. Pro tyto izotopy jsem spočítal reakční rychlosti podle vzorce 12.1 a porovnal je vzájemně mezi sebou. Následně jsem porovnal i modely s oběma konvertory a výsledky měření jsem vynesl do tabulek 11-3 a 11-4. Součástí výpočtů bylo určení účinnosti detektoru ϵ , který byl při testu v Yerevanu využit. Tato účinnosti jsou také vypsány v tabulkách a jejich hodnoty vyneseny do grafu na obrázku 11-1.

Výsledkem mé práce je zjištění že při využití konvertoru z oxidu beryllia, jsou reakční rychlosti ve fóliích menší, než-li u konvertoru z LiCl. Zatímco u BeO se reakční rychlosti u všech měřených izotopů pohybují v rozmezí řádů $10^{-28} - 10^{-32}$, u modelu s LiCl konvertorem hodnoty reakčních rychlostí dosahují řádů $10^{-26} - 10^{-29}$. To potvrzuje i fakt, že u stejných izotopů, se stejnou energií gama, jsou reakční rychlosti na obou modelech odlišné. Na u konvertoru LiCl je reakční rychlost pro ^{197}Au s energií gama o dva řády větší, než-li u modelu s konvertorem BeO. Tento jev se projevuje u všech izotopů se stejnou energií E_γ které se podařilo měřit u obou měření.

Reference

- [1] Thermofisher.com. online, citováno 26-února-2020.
- [2] Wikipedia.org. online, citováno 26-února-2020.
- [3] Bremsstrahlung radiation, 2017. online, citováno 17-května-2020.
- [4] Kruhové urychlovače, 2019. online, citováno 17-dubna-2020.
- [5] Spallation neutron source, 2020. online, citováno 15-dubna-2020.
- [6] I. A. E. Agency. Spallation sources, 2019. online, citováno 27-prosince-2019.
- [7] J. Alvarez. Laser driven neutron sources: Characteristics, applications and prospects, 2008. online, citováno 4-ledna-2020.
- [8] M. R. L. B. H. Z. ANDERSON, I. S. *Neutron Imaging and Applications*. Springer US, 2009.
- [9] J. BENEŠ. *Základy lékařské biofyziky*. 3. vydání. Praha: Karolinum, 2011.
- [10] J. M. CARPENTER. Neutron production, moderation, and characterization of sources., 2004. online, citováno 12-února-2020.
- [11] Dragunov. *Modernization of the IBR-2 pulsed research reactor*. Energy, 2012.
- [12] K. Eshwarappa, K. Siddappa, Y. Kashyap, A. Sinha, P. Sarkar, B. Godwal, et al. Estimation of photoneutron yield from beryllium target irradiated by variable energy microtron-based bremsstrahlung radiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 540(2-3):412–418, 2005.
- [13] A. info.cz. Technecium-99m: Výroba a uplatnění nejužívanějšího radioizotopu v lékařské diagnostice, 2013. online, citováno 10-května-2020.
- [14] K. M. J. Fernández-Tobiasa. *Laser Driven Neutron Sources: Characteristics, Applications and Prospects*. Y. Katob, 2014.
- [15] M. JELÍNEK. *Analýza neutronového pole laboratorního AmBe zdroje s využitím měřicího stendu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017.
- [16] J. John. Jaderná chemie vČera, dnes a zítra, 2013. online, citováno 15-dubna-2020.
- [17] J. K. R.-W. S. N. F. H. E. J.Scherzingerab, R.AlJebali. *A comparison of untagged gamma-ray and tagged-neutron yields from $^{241}\text{AmBe}$ and $^{238}\text{PuBe}$ sources*. 2017.
- [18] Y. K.-A. S. P. B. K.M.Eshwarappaa Ganesh, K.Siddappa. *Estimation of photoneutron yield from beryl lium target irradiated by variable energy microtron-basedbremsstrahlung radiation*. 2005.
- [19] T. Kostka. *JADERNÁ ELEKTRÁRNA*. Ostravská Univerzita, 2017.
- [20] O. R. N. Laboratory. How sns works, 2019. online, citováno 31-prosince-2019.

-
- [21] K. Li. Study of spontaneous fission of ^{252}Cf : Structure of neutron-rich nuclei, gamma-ray angular correlation and g-factor, 2008. online, citováno 4-ledna-2020.
- [22] J. E. M. M. P. D. M. Kolečka, M. Vinš. Evaluation of irradiation conditions after lvr-15 heu to leu conversion, 2012. online, citováno 15-dubna-2020.
- [23] G. McCracken, P. E. Stott, and M. Řípa. *Fúze: energie vesmíru*. Mladá fronta, 2006.
- [24] L. Musílek. *Dozimetrie neutronů*. ČVUT, 1998.
- [25] E. National Academies of Sciences, Medicine, et al. *Molybdenum-99 for medical imaging*. National Academies Press, 2016.
- [26] J. NAVRÁTIL, Leoš a ROSINA. *Medicínská biofyzika*. 1. vydání. Praha: Grada, 2005.
- [27] F. L. of Neutron Physics. Ibr-2. online, citováno 15-dubna-2020.
- [28] D. Opletal. Malý zajíc, 2017. online, citováno 27-prosince-2019.
- [29] A. C. W. OSBORNE-LEE, I. W. *Californium-252: A Remarkable Versatile Radioisotope*. Oak Ridge National Laboratory, 1996.
- [30] L. Phoenix. Phoenix. Neutron generators, 2020. online, citováno 11-března-2020.
- [31] V. Pospíšil. Atomová a jaderná fyzika. online, citováno 15-dubna-2020.
- [32] J. REIJONEN. *Kompaktní neutronové generátory pro lékařské, vnitřní zabezpečení a planetární průzkum*. Sborník z konference 2005 Accelerator Particle, 2005.
- [33] J. ROSINA, Josef a KOLÁŘOVÁ. *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů*. 1. vydání. Praha: Grada, 2006.
- [34] A. A. K. N. B. Rubin. Urychlovače nabitých částic, 1956. online, citováno 17-KVĚTNA-2020.
- [35] Z. Sommerová. Zvídavé neutrony, 2016. online, citováno 17-KVĚTNA-2020.
- [36] Technik. Ve švédském lundu vzniká evropský spalační zdroj, 2015. online, citováno 27-prosince-2019.
- [37] M. Weinfurt. Urychlovače nabitých částic, 2002. online, citováno 2-ledna-2020.
- [38] S. úřad pro jadernou bezpečnost. Příloha 8 národní zprávy ČR pro účely Úmluvy o jaderné bezpečnosti, 2019. online, citováno 27-prosince-2019.
- [39] M. ŠTEFÁNIK. *TExperimentálne stanovenie spektier urýchľovačom riadených neutrónových generátorov Praha*. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, 2015.